

Ю. А. ШУМИХИН

ВВЕДЕНИЕ В ИМПУЛЬСНУЮ ТЕХНИКУ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

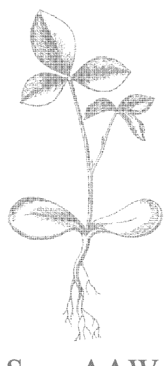
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА *А. И. БЕРГА*

Выпуск 143

Ю. А. ШУМИХИН

ВВЕДЕНИЕ В ИМПУЛЬСНУЮ ТЕХНИКУ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

52138

Книга «Введение в импульсную технику» предназначается для радиолюбителей и имеет целью первоначальное ознакомление их с импульсными схемами и различными областями их использования.

Дается краткое описание основных импульсных схем и рассказывается об их применении в радиолокации, импульсной многоканальной радиосвязи, радионавигации и т. д.

Редактор *Е. П. Дементьев* Технич. редактор *А. М. Фридкин*

Сдано в набор 6/III 1952 г. Подписано к печати 17/V 1952 г.
Бумага 84 × 108[1]/[32] $1^3/_4$ бумажн. лист., = 5,74 п. л. Уч.-изд. л. 6,7
Т-03949 Тираж 10 000 экз. Заказ № 3107
Цена 2 р. 70 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.).

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Радиотехника в Советском Союзе находится в состоянии непрерывного развития и совершенствования. С каждым годом растет количество радиостанций и радиослушателей. Советские ученые создают фундаментальные теоретические работы по актуальнейшим вопросам радиотехники. Инженеры-радисты неустанно ищут и находят все новые пути практического использования радио — гениального изобретения нашего соотечественника А. С. Попова.

Своими выдающимися успехами советская радиотехника обязана той исключительной заботе о развитии науки в нашей стране, которую повседневно проявляют большевистская партия и великий Сталин.

В связи с развитием ряда областей техники и в особенности радиолокации за последние годы приобрели большое значение устройства, служащие для получения, преобразования, усиления и передачи кратковременных электрических импульсов. Вопросами конструирования таких устройств занимается новая отрасль техники, называемая импульсной техникой.

Многочисленные теоретические и экспериментальные работы советских ученых и инженеров сыграли исключительную роль в создании импульсной техники и обеспечили прочную базу для ее дальнейшего развития. Импульсные устройства нашли широкое применение не только в радиолокации. Оказалось возможным использовать импульсные устройства для целей самолетовождения и кораблевождения и для передачи радиотелефонных сигналов. С помощью импульсов можно определять места повреждений на линиях электропередач, синхронизировать телевизионные изображения и решать другие важные технические задачи.

Перед устройствами, основанными на использовании импульсной техники, открываются широкие перспективы применения их в народном хозяйстве нашей Родины.

Радиолокаторы используются для обеспечения безопасности воздушного и морского движения, для метеорологических наблюдений и геодезических измерений, при производстве научных исследований. Импульсные связные радиостанции могут обеспечить связь на многочисленных строительствах каналов, железных дорог и линий электропередач, ведущихся во всех концах Советского Союза.

Наконец, импульсные устройства могут найти разнообразное применение в технике, медицине, быту.

Именно потому, что импульсная техника находит все большее применение в народном хозяйстве нашей страны, ею должен овладеть советский радиолюбитель, вся творческая деятельность которого направлена на благо великой социалистической Родины.

Эта книга ставит своей целью ввести радиолюбителя в круг тех задач, которые решаются современной импульсной техникой. Полное освещение этих вопросов невозможно в рамках небольшой брошюры. Наша задача заключается в том, чтобы ознакомиться с основными импульсными схемами и их практическим использованием в радиолокаторах, импульсных связных станциях и других импульсных устройствах.

Ю. Шумихин

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ИМПУЛЬСЫ И ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ

1. ЧТО ТАКОЕ ИМПУЛЬС

Приступая к ознакомлению с импульсной техникой, прежде всего следует остановиться на самом понятии «импульс».

Можно сказать, что импульсом электрического тока или напряжения называется ток или напряжение, действующие в течение короткого промежутка времени. Однако такое определение страдает большой неточностью. В самом деле, какой промежуток времени можно считать коротким?

Для ответа на этот вопрос следует рассмотреть некоторые особенности работы электрических цепей.

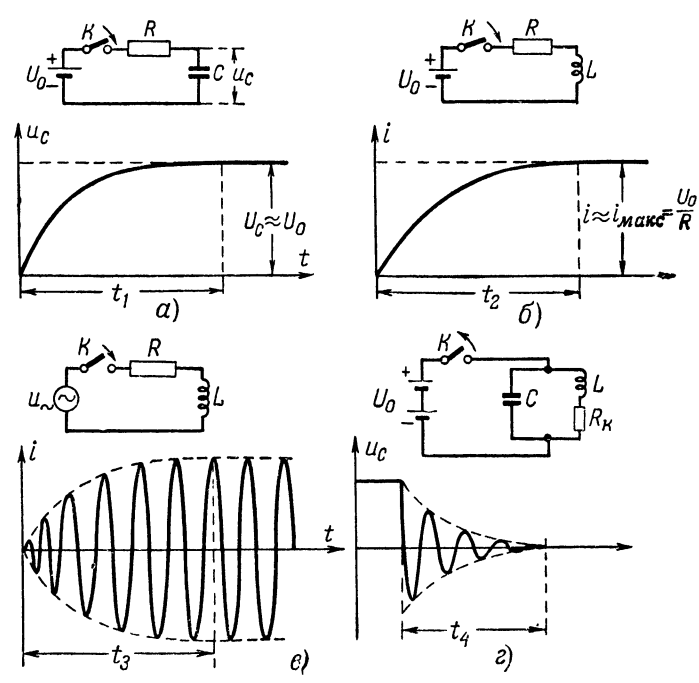
Известно, что в электрических цепях в моменты их включения и выключения наблюдаются процессы, которые по своему характеру значительно отличаются от процессов, происходящих при установившемся режиме.

Так, например, если цепь, составленную из сопротивления R и конденсатора C, подключить к источнику постоянного напряжения U_0 (фиг. 1,*а*), то напряжение на конденсаторе C достигнет величины, практически равной напряжению батареи не мгновенно, а лишь через некоторое время t_1. Точно так же, если катушку индуктивности L, соединенную последовательно с сопротивлением R, подключить к батарее, то ток в цепи станет практически равным своей конечной величине не сразу, а лишь через некоторое время t_2 (фиг. 1,*б*).

Подобная картина наблюдается и в цепях переменного тока. Например, если источник переменного напряжения $u_{\sim}$ подключить к цепи, состоящей из сопротивления R и катушки индуктивности L, то амплитуда тока в цепи станет практически равна своей конечной величине не сразу, а лишь через некоторое время t_3 (фиг. 1,*в*).

При выключении электрических схем точно так же имеют место специфические процессы перехода от рабочего состояния к нерабочему.

Например, если катушка индуктивности L и конденсатор C были в течение некоторого времени подключены к источнику постоянного напряжения U_0, то конденсатор C был заряжен до напряжения U_0, а по катушке протекал ток $i_к = \frac{U_0}{R_к}$ (фиг. 1,*г*). После выключения батареи в контуре устанавливается режим свободных затухающих колебаний.



Фиг. 1. Переходные процессы в электрических цепях.

Подытоживая сказанное, можно заметить, что в электрических цепях, содержащих емкости и индуктивности, переход от одного устойчивого состояния к другому происходит не сразу, а лишь по прошествии некоторого интервала времени, в течение которого наблюдаются так называемые переходные процессы. Эти переходные процессы по своему характеру существенно отличаются от процессов, имеющих место при установившемся режиме. Так, напри-

мер, для схемы, изображенной на фиг. 1,*а*, во время переходного процесса напряжение на конденсаторе C возрастает по плавной кривой, а при установившемся режиме — остается постоянным. Наличие переходных процессов объясняется тем, что запас энергии в электрической схеме не может измениться скачком. Запас энергии w_c в конденсаторе, имеющем емкость C, пропорционален квадрату напряжения u на его обкладках:

$$w_C = \frac{Cu^2}{2},$$

а запас энергии w_L в катушке с индуктивностью L пропорционален квадрату тока i, протекающего по катушке:

$$w_L = \frac{Li^2}{2}.$$

Но запас энергии, как сказано, не может измениться скачком. Поэтому напряжение на конденсаторе и ток в катушке индуктивности не могут изменяться скачками. Это обстоятельство и приводит к появлению переходных процессов, во время которых происходит плавное изменение напряжений на конденсаторах и плавное изменение токов в катушках индуктивности.

В схемах, которые содержат только активные сопротивления, ток и напряжение могут, казалось бы, изменяться скачком. Однако это утверждение справедливо лишь в том случае, если не учитывать наличия паразитных емкостей и индуктивностей. Но практически невозможно представить себе реальную схему, которая не содержала бы, например, монтажных емкостей. Поэтому даже в схемах, составленных из одних активных сопротивлений, наблюдаются кратковременные переходные процессы. Длительность переходных процессов определяется соотношением между параметрами схемы R, C и L. Переходные процессы наблюдаются не только во время включения и выключения электрических схем, но также и при воздействии на них различного рода электрических сигналов. В зависимости от длительности сигнала, воздействующего на электрическую схему, и в зависимости от параметров самой схемы переходные процессы, вызванные включением сигнала, могут закончиться еще задолго до прекращения сигнала или, наоборот, могут еще продолжаться, когда сигнал прекратится.

Условимся считать кратковременный электрический сигнал импульсным, если его длительность сравнима с дли-

тельностью переходных процессов в цепи, на которую воздействует этот сигнал.

Это означает, что к моменту окончания импульсного сигнала в схеме еще не успевают закончиться переходные процессы, вызванные включением сигнала, или же они заканчиваются, но установившийся режим продолжается лишь в течение очень малого времени. Наоборот, если длительность сигнала во много раз превосходит длительность переходных процессов в схеме, то такой сигнал нельзя назвать импульсным.

Однако теперь возникает другой вопрос. Нельзя ли представить себе обычное синусоидальное напряжение высокой частоты в виде ряда положительных и отрицательных импульсов, непрерывно следующих друг за другом?

Действительно, если период колебаний мал, то длительность таких «импульсов» может оказаться сравнимой с временем переходных процессов в схеме. Однако в данном случае «импульсы» следуют непрерывно друг за другом и переходные процессы, возникшие в схеме благодаря действию одного «импульса», еще не прекратятся к моменту прихода следующего «импульса».

Для того чтобы подчеркнуть различие между импульсными и непрерывными процессами, предъявляют определенные требования не только к длительности самого импульса, но и к длительности паузы между импульсами. Сигнал считают импульсным лишь в том случае, если все переходные процессы в цепи, обусловленные появлением импульса на ее входе, заканчиваются до прихода следующего импульса.

Подводя итоги приведенным рассуждениям, можно сказать, что электрический сигнал следует называть импульсным, если:

1) длительность сигнала сравнима с длительностью переходных процессов в цепи, на которую подается этот сигнал;

2) к моменту начала действия импульса в электрической цепи уже отсутствуют переходные процессы, обусловленные воздействием предыдущих импульсов.

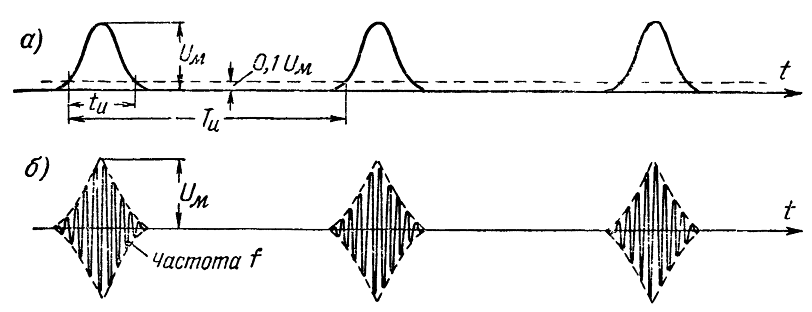
2. ВИДЕОИМПУЛЬСЫ И РАДИОИМПУЛЬСЫ

В импульсной технике приходится иметь дело с двумя видами импульсных сигналов. Импульсный сигнал, называемый видеоимпульсом, представляет собой возрастание

напряжения или тока от нуля до максимального значения и затем — спадание от максимального значения снова до нуля (фиг. 2,*а*).

Импульсный сигнал, называемый радиоимпульсом, состоит из нескольких периодов высокочастотных колебаний тока или напряжения (фиг. 2,*б*).

Радиоимпульсы используются в тех случаях, когда передача импульсных сигналов осуществляется по радио. Видеоимпульсы находят широкое применение не только в им-



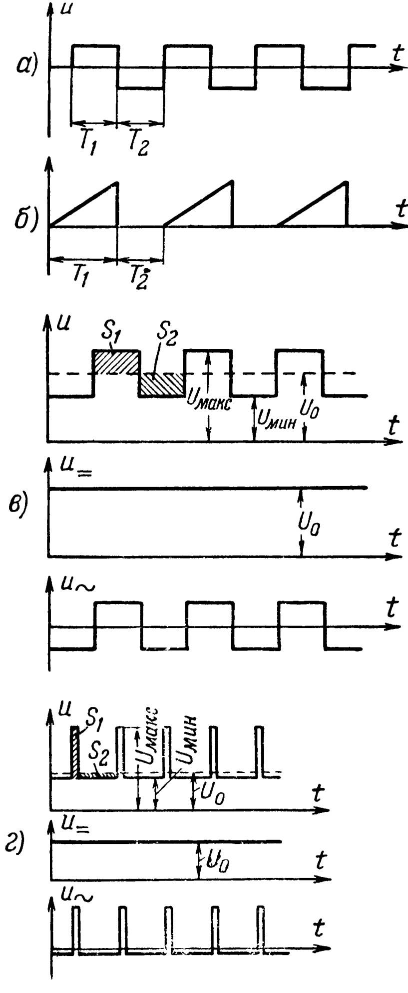
Фиг. 2. Периодические видеоимпульсы и радиоимпульсы.
а — видеоимпульсы; *б* — радиоимпульсы.

пульсных радиостанциях, но и в многочисленных импульсных устройствах, не требующих передачи сигналов по радио.

Видеоимпульсы характеризуются формой, длительностью $t_и$, максимальной величиной или амплитудой импульса $U_м$ и полярностью. Боковая сторона импульса, характеризующая его нарастание или спад, называется фронтом импульса. Импульс имеет передний и задний фронт. Для определения длительности импульса нужно условиться об уровне отсчета. Можно, например, говорить о длительности импульса на уровне 0,1 от его максимального значения (фиг. 2,*а*). По полярности видеоимпульсы разделяются на положительные и отрицательные. Видеоимпульсы в действительности никогда не имеют строгой геометрической формы, но для упрощения задачи рассматривают импульсы прямоугольной, треугольной, трапециевидной или какой-либо иной правильной формы.

Радиоимпульсы получаются путем амплитудной модуляции высокочастотных колебаний с помощью видеоимпульсов. Поэтому огибающая радиоимпульса имеет форму, близкую к форме модулирующего видеоимпульса.

Помимо формы, длительности и амплитуды, радиоимпульс характеризуется частотой f своего высокочастотного «заполнения».



Фиг. 3. Виды периодических несинусоидальных напряжений.

В ряде практических случаев используются периодические последовательности видеоимпульсов или радиоимпульсов. На фиг. 2 приведены периодические последовательности видеоимпульсов и радиоимпульсов. Временный интервал между одинаковыми точками двух соседних импульсов $T_и$ носит название периода повторения импульсов. Если период повторения равен, например 1/1 000 сек., то очевидно, что за 1 сек. будет следовать 1 000 импульсов. Величина $F_и$ равная количеству импульсов в 1 сек., называется частотой повторения импульсов. Период повторения $T_и$ и частота повторения связаны зависимостью:

$$F_и = \frac{1}{T_и}.$$

Отношение периода повторения импульсов $T_и$ к длительности импульса $t_и$ называется скважностью Q:

$$Q = \frac{T_и}{t_и}.$$

Импульсные устройства, которые рассматриваются в настоящей книге, работают импульсами длительностью в несколько единиц, десятков или сотен микросекунд [1 микросекунда (*мксек*) равна $^1/_{1\,000\,000}$ сек.], а паузы между

импульсами в ряде случаев во много сотен раз превосходят длительность самих импульсов.

В заключение настоящего параграфа следует отметить, что в импульсных устройствах часто используются схемы, которые вырабатывают не импульсы, а напряжения или токи несинусоидальной формы. На фиг. 3,*а* представлена периодическая кривая напряжения, состоящего из чередующихся положительных и отрицательных прямоугольных выбросов, длительности которых T_1 и T_2 могут быть одинаковыми или различными. Напряжение, имеющее такую форму, будем называть периодическим напряжением прямоугольной формы (период T равен сумме $T_1 + T_2$). На фиг. 3,*б* дан пример периодического пилообразного напряжения. На фиг. 3,*в* показано напряжение сложной формы, которое содержит постоянную составляющую U_0 и переменную составляющую в виде периодического напряжения прямоугольной формы.

Здесь величина постоянной составляющей U_0 соответствует уровню, обеспечивающему равенство площадей прямоугольников S_1 и S_2. Напряжение сложной формы, изображенное на фиг. 3,*г*, точно так же можно разложить на постоянную и переменную составляющие. В данном случае длительность положительных выбросов напряжения во много раз меньше длительности отрицательных выбросов, и поэтому постоянная составляющая U_0 почти равна напряжению $U_{мин}$.

3. ОСНОВНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ

Радиоимпульсы используются для того, чтобы передать импульсные сигналы на расстояние без проводов. Задачи, выполняемые видеоимпульсами, значительно разнообразней. Можно без преувеличения сказать, что именно многочисленные и порой весьма остроумные преобразования видеоимпульсов обеспечили возможность широкого и разнообразного использования импульсных устройств. Это, конечно не означает, что передача и прием импульсных радиосигналов является делом настолько простым, что о нем можно упоминать вскользь. Напротив, указанные вопросы являются сложнейшими в радиотехнике. Более полное изложение этих вопросов должно явиться содержанием отдельной книги. Здесь мы будем рассматривать только видеочастотные части импульсных устройств, помня о том, что всякий раз, когда требуется передать импульсный

сигнал на расстояние без проводов, используются устройства, генерирующие и принимающие радиоимпульсы. Прежде чем переходить к рассмотрению разнообразного использования видеоимпульсов, нужно вкратце ознакомиться с основными типами импульсных схем.

Наиболее часто импульсные схемы выполняют следующие задачи:

1) преобразование синусоидального напряжения в периодическую последовательность видеоимпульсов;

2) генерация периодических видеоимпульсов;

3) изменение длительности импульсов (укорочение и удлинение) и их формы;

4) задержка импульсов во времени;

5) изменение частоты повторения импульсов.

Помимо схем, вырабатывающих или преобразующих импульсы, в импульсных устройствах находят широкое применение различные генераторы несинусоидальных напряжений и токов. В настоящей главе, наряду с описанием импульсных схем, будет дано описание ряда устройств, вырабатывающих периодическое напряжение прямоугольной и пилообразной формы.

Амплитудные ограничители. Как известно, для связных радиостанций серьезное значение имеет вопрос о неискаженной передаче сигналов. В импульсных устройствах, напротив, очень часто приходится заниматься сознательным искажением тех или иных сигналов. К числу таких операций относится ограничение сигналов по амплитуде.

Амплитудные ограничители применяются, в частности, для преобразования синусоидального напряжения в периодическое напряжение прямоугольной формы.

Простейший ограничитель состоит из диода *Д* и сопротивления *R* (фиг. 4).

Подавая на вход такой схемы синусоидальное напряжение, получим на сопротивлении *R* напряжение в виде полупериодов синусоиды, имеющих неизменную полярность. Так как в данном случае «срезается» отрицательный полупериод входного напряжения, ограничитель носит название ограничителя снизу.

Нетрудно убедиться в том, что, переменив концы включения диода, получим ограничитель сверху, «срезающий» положительные периоды синусоиды.

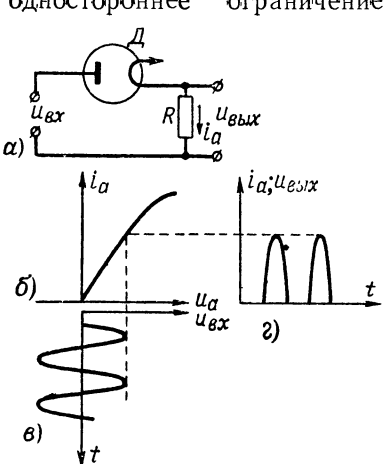
Ограничитель, производящий ограничение только сверху или только снизу. носит название одностороннего ограничителя.

Включая в цепь ограничителя дополнительный источник постоянного напряжения, можно изменять порог ограничивающего действия схемы или, как говорят, «порог ограничения».

При помощи двух диодов можно произвести одновременное ограничение сверху и снизу. Однако эту задачу проще решить, используя в схеме ограничителя триод (или многосеточную лампу).

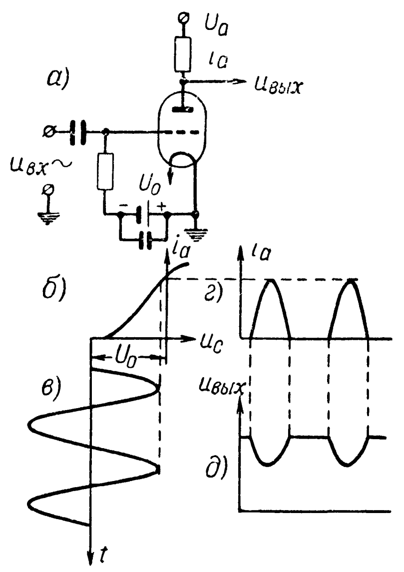
Дополнительным преимуществом такой схемы является усиление ограниченного напряжения в анодной цепи лампы.

Путем надлежащего выбора исходного смещения здесь можно произвести одностороннее ограничение



Фиг. 4. Диодный „ограничитель снизу".

а — принципиальная схема; *б* — характеристика анодного тока; *в* — входное напряжение; *г* — изменение анодного тока и напряжения на нагрузке в зависимости от времени.

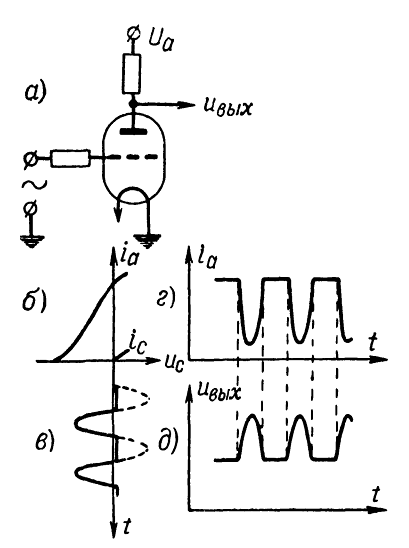


Фиг. 5. Амплитудный „ограничитель снизу" на триоде.

а — принципиальная схема; *б* — характеристика анодного тока; *в* — входное напряжение; *г* — анодный ток; *д* — напряжение на выходе схемы.

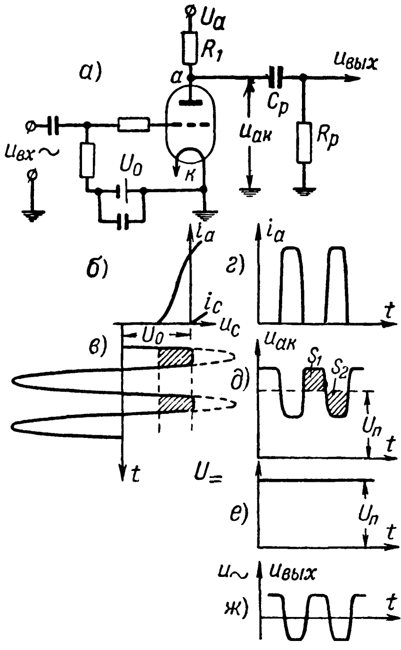
снизу или одностороннее ограничение сверху. При ограничении снизу (фиг. 5) лампа запирается исходным отрицательным смещением U_0. Отпирание ее происходит только во время действия положительного полупериода входного напряжения. При ограничении сверху (фиг. 6) исходное отрицательное смещение не подается, а в сеточную цепь включается большое сопротивление. Во время действия положительного полупериода входного напряжения по сеточной

цепи проходит ток и на этом сопротивлении создается падение напряжения, отрицательное относительно сетки, вследствие чего анодный ток почти не изменяется. Во время действия отрицательного полупериода входного напряжения происходит отсечка анодного тока. При помощи ограничителя, собранного на триоде, возможно произвести одновременное ограничение и сверху, и снизу (фиг. 7). Ограничение снизу происходит за счет отсечки анодного тока,



Фиг. 6. Амплитудный „ограничитель сверху“ на триоде.

а — принципиальная схема; *б* — характеристики анодного и сеточного токов; *в* —напряжение на сетке лампы; *г*—анодный ток; *д* — напряжение на выходе схемы.



Фиг. 7. Двусторонний амплитудный ограничитель на триоде.

а — принципиальная схема; *б*—характеристики анодного и сеточного токов; *в* — напряжение на сетке лампы; *г* — анодный ток; *д* —напряжение между анодом и катодом; *е* — постоянная составляющая этого напряжения; *ж*—переменная составляющая.

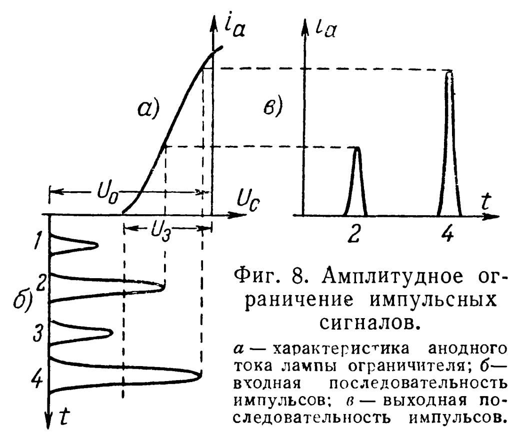
а сверху — за счет захода в область положительных сеточных напряжений. Амплитудный ограничитель, производящий одновременное ограничение сверху и снизу, называется двусторонним ограничителем.

Если амплитуда входного синусоидального напряжения значительно больше величины запирающего напряжения U_0, то по анодной цепи лампы проходит ток, имеющий

форму почти прямоугольных выбросов (фиг. 7,*г*). Напряжение на участке анод — катод лампы $u_{ак}$ равно:

$$u_{ак}=U_a-i_aR_1\,.$$

Форма его показана на фиг. 7,*д*. Это напряжение содержит постоянную составляющую $U_=$ (фиг. 7,*е*) и переменную составляющую $u_\sim$ в виде периодического напряжения прямоугольной формы (фиг. 7,*ж*). Для того чтобы отделить переменную составляющую от постоянной, нужно на выходе схемы включить переходную цепь, состоящую из разделительного конденсатора C_p и сопротивления R_p. Напряжение на сопротивлении R_p при надлежащем выборе величин C_p и R_p будет повторять по форме переменную составляющую анодного напряжения лампы ограничителя (т. е. получим $u_{вых}=u_\sim$). Амплитудный ограничитель можно использовать не только для ограничения синусоидального напряжения, а также и для ограничения импульсных сигналов. Так, например, при помощи ограничителя можно срезать все импульсы, амплитуды которых меньше разности между выбранным смещением U_0 и смещением, при котором происходит отсечка анодного тока лампы (фиг. 8).



Фиг. 8. Амплитудное ограничение импульсных сигналов.

а — характеристика анодного тока лампы ограничителя; *б* — входная последовательность импульсов; *в* — выходная последовательность импульсов.

Переходные и дифференцирующие цепи. Если на вход цепи, состоящей из последовательного соединения конденсатора C и сопротивления R (фиг. 1,*а*), включить скачком постоянное напряжение U_0, то начнется процесс заряда конденсатора. Ток заряда в первый момент времени будет наибольшим, а затем начнет падать, так как по мере заряда конденсатора напряжение на нем возрастает, будучи обратным по знаку, приложенному напряжению U_0.

Быстрота протекания процесса заряда зависит от величины емкости C и сопротивления R. Она определяется так

называемой постоянной времени T цепи $R—C$, которая равна

$$T = R \cdot C.$$

Чем меньше постоянная времени T, тем быстрее зарядится конденсатор.

Физически это понятно, так как конденсатор малой емкости заряжается быстрее, чем конденсатор большой емкости. С другой стороны, один и тот же конденсатор заряжается тем быстрее, чем меньше сопротивление, стоящее в цепи заряда, т. е. чем больше зарядный ток.

Величина T имеет размерность времени. Если R взято в омах, а C — в микрофарадах, то T получается в микросекундах

$$T_{(мсек)} = R_{ом} \cdot C_{(мкф)}.$$

Например, при $R = 5\,000$ *ом* и $C = 0{,}01$ *мкф* $T_{(мксек)} = 50$ *мксек*.

Предположим теперь, что по прошествии некоторого времени $t_и$ постоянное напряжение выключается, а конденсатор C замыкается на сопротивление R.

Рассмотрим процессы, происходящие при этом, для двух случаев: 1) постоянная времени цепи $R—C$ значительно меньше времени $t_и$:

$$T \ll t_и$$

(значок $\ll$ означает значительно меньше) и 2) постоянная времени T значительно больше времени $t_и$:

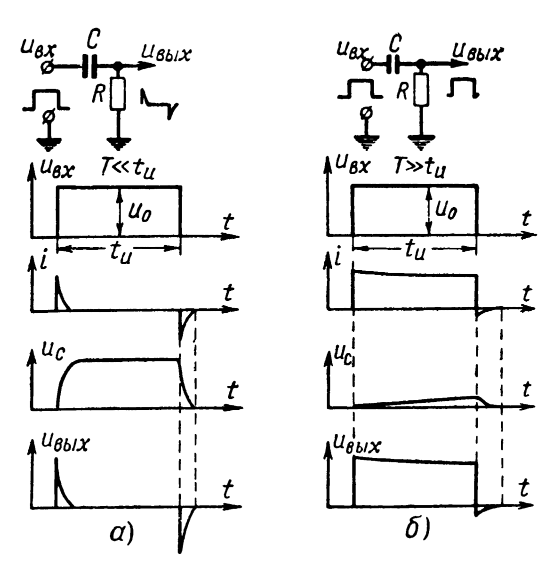
$$T \gg t_и$$

(значок $\gg$ означает значительно больше).

1. Случай, когда $T \ll t_и$ (фиг. 9,*а*). Так как постоянная времени T, определяющая скорость заряда конденсатора, значительно меньше времени действия входного напряжения $t_и$, то к концу времени $t_и$ конденсатор почти полностью заряжен до напряжения U_0, зарядный ток i и выходное напряжение $u_{вых}$ практически равны нулю.

После выключения входного напряжения конденсатор быстро разряжается через сопротивление R. Ток разряда i и выходное напряжение $u_{вых}$ во время разряда имеют характер кратковременных всплесков, полярность которых противоположна полярности тока заряда и выходного напряжения во время заряда.

2. Случай, когда $T \gg t_u$ (фиг. 9,*б*). Так как постоянная времени T, определяющая скорость заряда конденсатора значительно превосходит длительность импульса t_u, то к концу времени t_u конденсатор зарядится еще очень мало, а зарядный ток i останется почти таким же, каким он был в начале заряда. Вследствие этого напряжение на сопротивлении R почти полностью равно приложенному напряжению U_0 в течение всего времени t_u.



Фиг. 9. Дифференцирующая и переходная цепи $R-C$.

а — дифференцирующая цепь; *б* — переходная цепь.

После выключения входного напряжения конденсатор начинает разряжаться через сопротивление R. Разряд идет значительно медленнее, чем в случае, когда $T \ll t_u$, но зато и величина начального напряжения на конденсаторе значительно меньше, чем в случае, когда $T \ll t_u$.

Напряжение на сопротивлении R при разряде конденсатора имеет характер небольшого отрицательного всплеска. Рассматривая графики, изображенные на фиг. 9, можно сказать, что описанный процесс включения и выключения постоянного напряжения в цепь $R-C$ равноценен подаче на вход этой цепи напряжения прямоугольной формы длительностью t_u.

Подводя итог проведенным рассуждениям, можно сказать:

1) если на вход цепи $R-C$ подается импульс напряжения прямоугольной формы и выполняется соотношение

$$T \ll t_u,$$

то на сопротивлении R образуются два кратковременных импульса напряжения (фиг. 9,*а*).

Первый из этих импульсов соответствует переднему фронту входного прямоугольного импульса напряжения. При положительном входном напряжении он также положительный.

Второй импульс соответствует заднему фронту прямоугольного импульса напряжения. При положительном входном напряжении короткий задний импульс будет отрицательным.

Если напряжение, подаваемое на вход цепи $R-C$, не имеет прямоугольной формы, но выполняется соотношение $T \ll t_u$, то и в этом случае выходное напряжение будет иметь форму двух кратковременных импульсов, соответствующих переднему и заднему фронту входного напряжения.

2) Если на вход цепи $R-C$ подается напряжение прямоугольной формы (фиг. 9,*б*), и выполняется соотношение

$$T \gg t_u,$$

то напряжение на сопротивлении R почти без искажений повторяет форму входного напряжения. Это утверждение справедливо и в том случае, если входное напряжение не имеет прямоугольной формы.

Цепь $R-C$, на выходе которой образуются два коротких импульса, соответствующих переднему и заднему фронту входного напряжения, называется дифференцирующей цепью. Цепь $R-C$, выходное напряжение которой повторяет по форме входное напряжение, называется переходной цепью. Для дифференцирующей цепи постоянная времени $T = R \cdot C$ значительно меньше длительности входного напряжения t_u. Для переходной цепи, наоборот, постоянная времени T значительно больше длительности входного напряжения t_u.

Пример. Пусть $t_u = 10$ *мксек*. Для дифференцирующей цепи возьмем:

$$T = \frac{1}{10} t_u = 1 \text{ мксек}$$

(при $R = 10\,000$ *ом* получим $C = 100$ *мкмкф*).

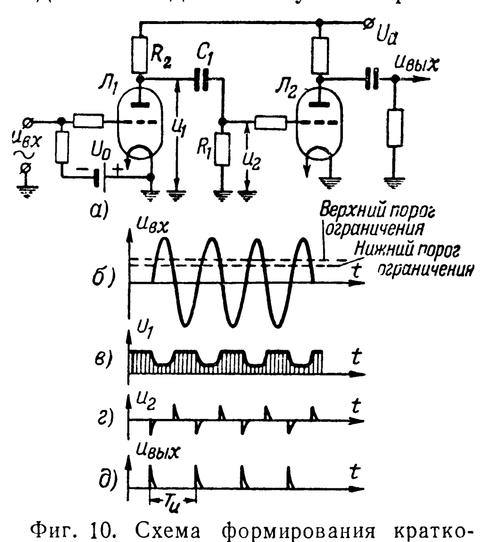
Для переходной цепи можно взять:

$$T = 10\, t_и = 100 \text{ мксек}$$

(при $R = 10\,000$ *ом* получим $C = 0{,}01$ *мкф*).

Переходная цепь используется как разделительный элемент между отдельными цепями. Дифференцирующая цепь используется в тех случаях, когда необходимо получить кратковременные импульсы, соответствующие по времени фронту входного напряжения.

Приведем пример совместного использования двустороннего ограничителя и дифференцирующей цепи для получения периодической последовательности кратковременных импульсов из синусоидального напряжения (фиг. 10). Принцип действия ограничителя, изображенного на этом рисунке, был описан выше. Лампа ограничителя заперта во время отрицательного полупериода входного напряжения и открыта во время его положительного полупериода. Дифференцирующая цепь $R_1 - C_1$ включена параллельно участку анод — катод лампы $Л_1$. Напряжение на участке анод — катод лампы $Л_1$ содержит постоянную составляющую и переменную составляющую в виде периодического напряжения прямоугольной формы (фиг. 10,*в*). Постоянная составляющая анодного напряжения через конденсатор C_1 не передается. Поэтому амплитудный ограничитель $Л_1$ по отношению к цепи R_1 — C_1 можно считать генератором периодического напряжения прямоугольной формы. На выходе дифференцирующей цепи R_1—C_1 образуются кратковременные импульсы, соответствующие по времени моментам перехода напряжения u_1



Фиг. 10. Схема формирования кратковременных периодических импульсов из синусоидального напряжения.

а — принципиальная схема; *б* — входное синусоидальное напряжение, *в* — напряжение на аноде лампы двустороннего ограничителя $Л_1$; *г* — напряжение на выходе дифференцирующей цепи $R_1 - C_1$; *д* — напряжение на выходе схемы.

от наибольшего значения к наименьшему и наоборот (фиг. 10,*г*).

Физическая сущность процессов, которые происходят в дифференцирующей цепи $R_1 — C_1$, включенной указанным образом, заключается в следующем. Когда лампа $Л_1$ заперта, то по цепи $R_2—C_1—R_1$ происходит заряд конденсатора C_1 от источника U_a. Напряжение на сопротивлении R_1 при этом является положительным относительно земли. Оно имеет форму кратковременного импульса, если цепь $R_1—C_1$ является дифференцирующей. Когда лампа $Л_1$ открыта, то происходит разряд конденсатора C_1 по цепи, составленной из внутреннего сопротивления лампы и сопротивления R_1. Напряжение на сопротивлении R_1 при этом является отрицательным относительно земли. Оно также имеет форму кратковременного импульса.

На выходе дифференцирующей цепи в рассматриваемом случае получаются периодические последовательности кратковременных положительных и отрицательных импульсов. В ряде случаев бывает желательным срезать либо положительные, либо отрицательные импульсы. Для выполнения этой задачи можно ввести в схему еще один ограничитель. При ограничении снизу будут срезаны отрицательные импульсы, а при ограничении сверху — положительные импульсы. В схеме, изображенной на фиг. 10,*а*, срезаются положительные импульсы.

Полученные на выходе схемы кратковременные импульсы (фиг. 10,*д*) будут иметь частоту повторения, равную частоте входного синусоидального напряжения.

Отметим, что импульсы, получаемые на выходе дифференцирующей цепи сильно ослабляются по сравнению с входным напряжением и должны быть усилены в последующих цепях импульсного устройства.

Мультивибратор. Напряжение прямоугольной формы можно получить не только путем ограничения синусоидального напряжения, но также и при помощи специального генератора, называемого мультивибратором.

Мультивибратор представляет собой двухкаскадный реостатно-емкостный усилитель, у которого выход каждого каскада соединен со входом другого каскада (фиг. 11,*а*).

В такой схеме могут возникнуть колебания. Предположим, что после включения источников питания токи в лампах и напряжения на конденсаторах достигли совершенно одинаковой величины. Такое состояние не может быть устойчивым по двум причинам:

Во-первых, в любом проводнике имеются так называемые тепловые флюктуации (колебания), которые выражаются в хаотическом изменении разности потенциалов на конце проводника вследствие беспорядочного теплового движения свободных электронов.

Во-вторых, анодный ток лампы также подвержен непрерывным флюктуациям вследствие колебаний температуры нити накала, напряжений питающих источников и т. п.

Допустим, что в результате тепловых флюктуаций напряжение на сетке лампы $Л_1$ относительно катода стало несколько более положительным.

Анодный ток лампы $Л_1$ немного увеличится. Это приведет к некоторому увеличению падения напряжения на сопротивлении R_3 и к уменьшению напряжения на аноде от величины u_1 до новой величины u_1'. Цепь, состоящая из конденсатора C_1 и сопротивления R_1, присоединена параллельно участку анод—катод лампы $Л_1$.

В статическом состоянии схемы конденсатор C_1 заряжен до напряжения u_1. Теперь он начнет разряжаться по цепи: левая пластина конденсатора — лампа $Л_1$ — сопротивление R_1 — правая пластина конденсатора. Ток разряда конденсаторов создает на сопротивлении R_1 падение напряжения, отрицательное относительно сетки лампы $Л_2$.

Фиг. 11. Мультивибратор.
а — принципиальная схема; *б* — напряжение на аноде лампы $Л_1$; *в* — напряжение на аноде лампы $Л_2$; *г* — напряжение на выходе переходной цепи $R — C$; *д* — напряжение на выходе дифференцирующей цепи $R — C$.

В результате этого анодный ток лампы $Л_2$ несколько уменьшится, а напряжение на ее аноде увеличится от значения u_2 до значения u_2'.

Вследствие этого конденсатор C_2, заряженный прежде до напряжения u_2, начнет дополнительно заряжаться до нового напряжения u_2'. Зарядный ток будет протекать по цепи: плюс источника анодного питания U_a —R_4—C_2—R_2—минус источника питания.

Зарядный ток конденсатора C_2, проходя через сопротивление R_2, создает на нем падение напряжения, положительное относительно сетки лампы $Л_1$. Анодный ток лампы $Л_1$ еще больше увеличится, что приведет к дальнейшему уменьшению анодного тока лампы $Л_2$.

Процесс нарастания анодного тока лампы $Л_1$ и уменьшения анодного тока лампы $Л_2$ происходит лавинообразно. В конце этого процесса анодный ток лампы $Л_1$ достигает максимального значения, а лампа $Л_2$ полностью запирается.

После этого конденсатор C_1 продолжает разряжаться по прежней цепи разряда, поддерживая на сопротивлении R_1 падение напряжения, достаточное для запирания лампы $Л_2$. Однако по мере того как напряжение на конденсаторе C_1 приближается к новому значению напряжения на аноде лампы $Л_1$, зарядный ток уменьшается, а следовательно, уменьшается и отрицательное смещение на сетке лампы $Л_2$. Наконец, наступает такой момент, когда лампа $Л_2$ открывается. При этом напряжение на ее аноде начинает уменьшаться, и весь процесс пойдет в обратном направлении. Конденсатор C_2 начнет разряжаться. Ток разряда этого конденсатора создаст на сетке лампы $Л_1$ отрицательное смещение. Анодный ток лампы $Л_1$ начнет уменьшаться. Зарядный ток конденсатора C_1 создаст на сетке лампы $Л_2$ положительное напряжение, и анодный ток этой лампы увеличится.

Этот процесс также проходит лавинообразно. В конце его лампа $Л_1$ полностью запирается, а лампа $Л_2$ — полностью отпирается. Такие процессы «переброса» мультивибратора из одного состояния неустойчивого равновесия в другое периодически повторяются в описанной последовательности.

Форма напряжения на аноде лампы $Л_1$ показана на фиг. 11,*б*, а на аноде лампы $Л_2$ — на фиг. 11,*в*. После переходной цепи R—C получается периодическое напряжение прямоугольной формы, практически повторяющее форму переменной составляющей напряжения u_2. Частота повторения и длительность положительных и отрицательных выбросов напряжения определяются величинами сопротивлений и емкостей, входящих в схему мультивибратора. Приближен-

но можно считать, что период повторения прямоугольных положительных или отрицательных выбросов напряжения T при соблюдении условий $R_3 \ll R_1$ и $R_2 \ll R_4$ равен:

$$T = R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2.$$

Если на выход мультивибратора поставить не переходную, а дифференцирующую цепь R—C, то получатся кратковременные импульсы, соответствующие моментам перехода анодного напряжения от положительных выбросов к отрицательным и наоборот.

Дополняя схему односторонним ограничителем, можно получить кратковременные импульсы положительной или отрицательной полярности, период повторения которых равен периоду повторения периодического напряжения прямоугольной формы, выработанного мультивибратором.

Мультивибраторы находят широкое распространение в различных импульсных устройствах и в измерительной аппаратуре. Теория мультивибратора разработана советскими учеными.

Ждущий мультивибратор. Для превращения коротких импульсов в длинные часто используется устройство, которое носит название ждущего мультивибратора (фиг. 12,*а*).

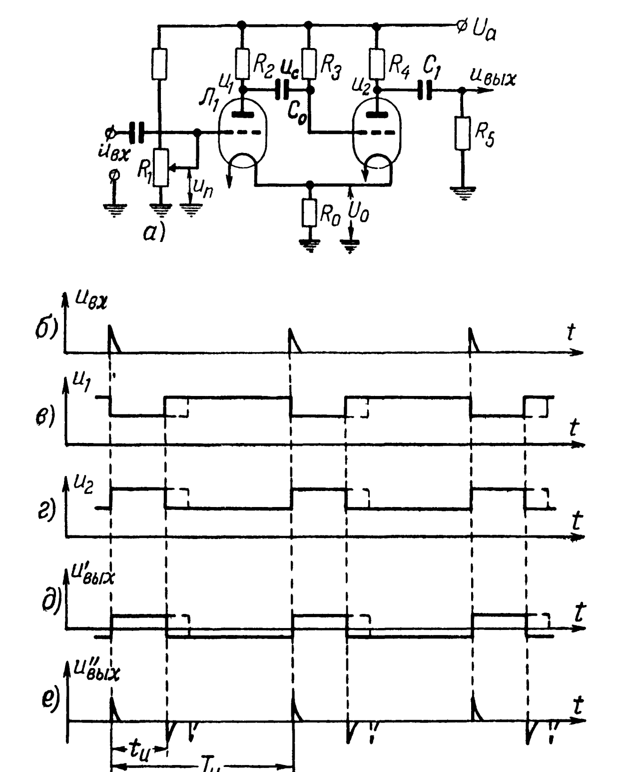
Эта своеобразная схема работает следующим образом. В отсутствии посторонних пусковых импульсов лампа $Л_2$ открыта. Ее анодный ток, проходя по катодному сопротивлению R_0, создает на нем падение напряжения U_0.

В сеточной цепи лампы $Л_1$ действуют два напряжения: напряжение U_0 — отрицательное относительно сетки и напряжение $U_п$ — положительное относительно сетки.

Путем регулировки потенциометра R_1 сумма напряжений $U_0 + U_п$ выбирается такой, чтобы лампа $Л_1$ была полностью заперта при открытой лампе $Л_2$. Напряжение на аноде запертой лампы $Л_1$ равно напряжению источника питания U_a. Конденсатор C_0 заряжен до напряжения U_a— U_0. Для определенности дальнейших рассуждений положим, что напряжение источника анодного питания равно 200 *в*. В таком состоянии схема может находиться долгое время.

Теперь подадим на сетку лампы $Л_1$ положительный пусковой импульс такой амплитуды, чтобы он смог отпереть лампу $Л_1$ (фиг. 12,*б*). Через лампу $Л_1$ пройдет импульс тока, и напряжение на ее аноде резко упадет. Допустим, что оно станет равным 50 *в* (относительно катода).

Между сеткой и катодом лампы $Л_2$ окажутся последовательно включенными конденсатор C_0, заряженный (при $U_a=200$ *в*) до напряжения $U_c \approx 200$ *в* (минус приложен к сетке лампы $Л_2$) и участок анод—катод лампы $Л_1$, падение



Фиг. 12. Ждущий мультивибратор.

а — принципиальная схема; *б* — пусковые импульсы; *в* — напряжение на аноде лампы $Л_1$; *г* — напряжение на аноде лампы $Л_2$; *д* — напряжение на выходе переходной цепи $R_5—C_1$; *е* — напряжение на выходе дифференцирующей цепи $R_5 — C_1$.

напряжения на котором равно 50 *в*, а по знаку противоположно напряжению на конденсаторе C_0. Поэтому суммарное напряжение между сеткой и катодом лампы $Л_2$ в момент действия пускового импульса станет равным

$$-200+50=-150\ в,$$

и лампа $Л_2$ запрется.

Падение напряжения на катодном сопротивлении R_0 теперь будет определяться только величиной анодного тока лампы $Л_1$, которая не сможет сама себя запереть. Поэтому после окончания пускового импульса схема останется в новом состоянии: лампа $Л_1$ будет открыта, а лампа $Л_2$ — закрыта.

При отпертой лампе $Л_1$ образуется цепь: плюс источника анодного питания —R_3—C_0—лампа $Л_1$—R_0— минус источника питания. По этой цепи будет происходить перезаряд конденсатора C_0, который через сопротивление R_3 оказался подключенным к плюсу источника питания пластиной, имевшей отрицательный потенциал.

По мере перезаряда конденсатора C_0 напряжение на сетке лампы $Л_2$ будет становиться все более положительным относительно катода и, наконец, наступит такой момент времени, когда лампа $Л_2$ откроется.

Анодный ток лампы $Л_2$, проходя по сопротивлению R_0, создает на нем падение напряжения, полностью запирающее лампу $Л_1$. Конденсатор C_0 по цепи: плюс источника анодного питания —R_2—C_0—(сетка — катод $Л_2$)—R_0— минус источника питания вновь зарядится почти до полного напряжения источника анодного питания.

Это состояние схемы будет сохраняться до тех пор, пока не придет новый пусковой импульс.

При воздействии на сетку лампы $Л_1$ периодической последовательности кратковременных пусковых импульсов (фиг. 12,*б*) на анодах ламп $Л_1$ и $Л_2$ будут получены напряжения, форма которых показана на фиг. 12,*в* и 12,*г*. Длительность $t_и$ положительного выброса напряжения на аноде лампы $Л_2$, равная времени запирания этой лампы, будет зависеть от постоянной времени цепи перезаряда конденсатора C_0 и от величины напряжения $U_п$, снимаемого с потенциометра R_1.

Поясним последнее утверждение. По мере увеличения напряжения $U_п$ ток через лампу $Л_1$ возрастает, и величина напряжения на участке анод — катод лампы $Л_1$ уменьшается (так как увеличивается падение напряжения на сопротивлении R_2).

Предположим, что напряжение запирания лампы $Л_2$ равно минус 10 *в*. Для того чтобы лампа $Л_2$ могла открыться, необходимо, чтобы сумма напряжений $u_C + u_1$, приложенная к сеточной цепи этой лампы, стала равна минус 10 *в*, т. е. должно быть выполнено условие

$$u_C + u_1 = -10\,в.$$

Пусть при $u_n = 5\ в$ $u_1 = 50\ в$, а при $u'_n = 10\ в$ $u'_1 = 20\ в$. В первом случае отпирание лампы $Л_2$ начнется в тот момент, когда напряжение на конденсаторе сделается равным $u_C = -10 - u_1 = -60\ в$. Во втором случае отпирание лампы $Л_2$ начнется при $u'_C = -10 - 20 = -30\ в$.

Так как начальное напряжение на конденсаторе C_0 в обоих случаях приблизительно равно 200 *в*, то для разряда конденсатора до 30 *в* потребуется большее время, чем для разряда до 60 *в*. Другими словами, лампа $Л_2$ будет заперта тем дольше, чем больше величина положительного напряжения U_n, снимаемого с потенциометра R_1 на сетку лампы $Л_1$.

Длительность положительного выброса напряжения в анодной цепи лампы $Л_2$ равна времени, в течение которого эта лампа заперта. Поэтому можно сделать следующий вывод:

Длительность положительного выброса напряжения t_u в анодной цепи лампы $Л_2$ будет тем больше, чем больше величина положительного напряжения U_n, подаваемого с потенциометра R_1 на сетку лампы $Л_1$. Эта зависимость обычно имеет прямолинейный характер:

$$t_u = kU_n,$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Дополнительная регулировка длительности выходного импульса осуществляется путем изменения величины сопротивления R_0. После переходной цепи C_1—R_5, подключенной к аноду лампы $Л_2$, получается периодическое напряжение прямоугольной формы (фиг. 12,*д*). Если длительность положительного выброса напряжения t_u значительно меньше периода повторения пусковых импульсов T_u, то амплитуда отрицательного выброса будет малой, и приближенно можно считать, что напряжение на выходе переходной цепи состоит из положительных выбросов прямоугольной формы, длительность которых равна t_u.

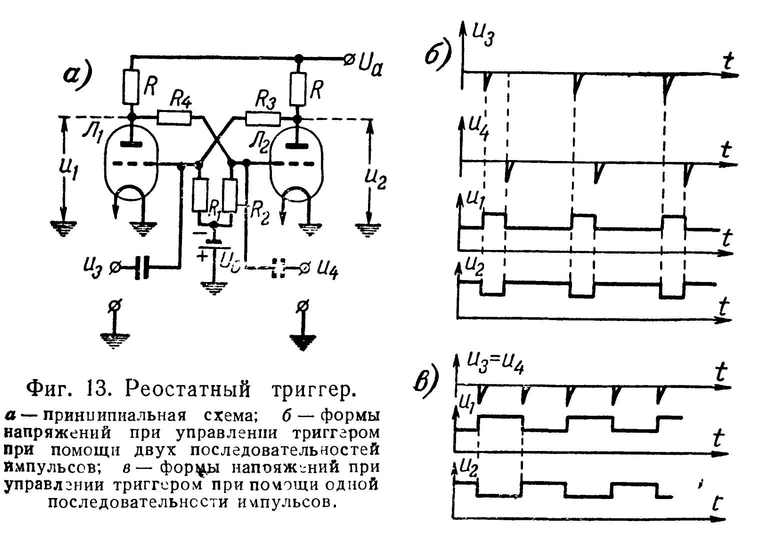
Если же напряжение, полученное на аноде лампы $Л_2$, подать на вход дифференцирующей цепи, то на ее выходе получится две последовательности коротких импульсов (фиг. 12,*е*). Импульсы одной последовательности будут совпадать по времени с пусковыми импульсами (фиг. 12,*б*), а импульсы другой последовательности будут сдвинуты во времени на величину t_u относительно пусковых импульсов.

Используя односторонний ограничитель, можно срезать импульсы, которые совпадают по времени с пусковыми, и получить последовательность импульсов, сдвинутых во времени на величину $t_и$ относительно пусковых импульсов. Таким образом, при помощи ждущего мультивибратора можно производить две операции:

1) превращать кратковременные импульсы в прямоугольные импульсы бо́льшей длительности;

2) задерживать кратковременные импульсы во времени.

Вместо того чтобы использовать два триода, можно собрать ждущий мультивибратор на одной многосеточной лам-



Фиг. 13. Реостатный триггер.

а — принципиальная схема; *б* — формы напряжений при управлении триггером при помощи двух последовательностей импульсов; *в* — формы напряжений при управлении триггером при помощи одной последовательности импульсов.

пе, используя в качестве второго анода экранную сетку. Ждущий мультивибратор такого типа называется фантастроном.

Реостатный триггер. Ждущий мультивибратор представляет собой импульсную схему, которая имеет одно устойчивое состояние. После окончания переходных процессов, вызванных воздействием пускового импульса, лампа $Л_1$ (фиг. 12,*а*) обязательно закроется, а лампа $Л_2$ — откроется. Однако существует ряд импульсных схем, имеющих два устойчивых состояния. Одна из таких схем носит название реостатного триггера (фиг. 13,*а*). Изображенная на фиг. 13,*а* схема совершенно симметрична. Несмотря на это, одна из ламп обязательно будет открыта, а другая — закрыта. Действительно, допустим, что обе лампы открыты,

и их анодные токи равны. Это состояние неустойчиво. Пусть вследствие флюктуаций анодный ток левой лампы $Л_1$ несколько уменьшится. Напряжение на участке анод — катод лампы $Л_1$ при этом немного возрастет. При этом немедленно увеличится напряжение на сетке лампы $Л_2$, так как сопротивления R_4 и R_2 составляют потенциометр, подключенный параллельно участку анод — катод лампы $Л_1$. Ввиду возрастания напряжения на сетке лампы $Л_2$ ее анодный ток увеличится, а напряжение на участке анод — катод упадет. Это приведет к уменьшению напряжения на сетке лампы $Л_1$, так как сопротивления R_3 и R_1 составляют потенциометр, подключенный параллельно участку анод — катод лампы $Л_2$. Ввиду уменьшения напряжения на сетке анодный ток лампы $Л_1$ еще больше упадет, а напряжение на ее аноде возрастет. Это приведет к дальнейшему увеличению анодного тока лампы $Л_2$.

Переходный процесс имеет лавинообразный характер. Лампа $Л_1$ почти мгновенно запирается, а лампа $Л_2$ полностью отпирается. В этом состоянии схема может находиться долгое время.

Конечно, можно повторить все рассуждения, полагая, что вначале уменьшился за счет флюктуаций анодный ток лампы $Л_2$, а не лампы $Л_1$. Тогда придем к выводу, что в конце переходного процесса закроется лампа $Л_2$, а не лампа $Л_1$. Какая из ламп будет в действительности заперта, а какая — отперта, это — дело случая. Несомненно лишь одно: если одна из ламп закрылась, а другая открылась, то такое состояние может продолжаться долго. Одинаково устойчиво и такое состояние схемы, когда лампа $Л_1$ открыта, и такое, при котором открыта лампа $Л_2$. Однако имеется весьма простой способ управления триггером. Для того чтобы перевести реостатный триггер из одного устойчивого состояния в другое, достаточно подать положительный импульс на сетку запертой лампы или отрицательный импульс на сетку отпертой лампы.

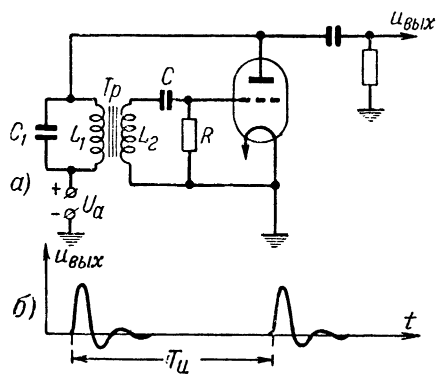
Подавая на вход триггера такие импульсы, можно по желанию запереть одну лампу триггера и отпереть другую.

В ряде случаев бывает необходимо отпирать и запирать лампы триггера периодически. Для этого можно подавать на управляющие сетки ламп $Л_1$ и $Л_2$ периодически повторяющиеся импульсы одинаковой полярности u_3 и u_4, сдвинутые во времени (фиг. 13,*б*).

Для этой же цели можно использовать одну периодическую последовательность отрицательных импульсов, пода-

ваемых одновременно на сетки обеих ламп (фиг. 13,*в*). Отрицательный импульс, поступая на сетку отпертой лампы триггера, запирает ее, вследствие чего в анодной цепи возникает положительный импульс напряжения, в K раз больший по амплитуде (K — коэффициент усиления каскада). Этот положительный импульс передается на сетку ранее запертой лампы. Здесь он действует совместно с отрицательным импульсом, поступившим от внешнего источника. Однако положительный импульс в K раз больше отрицательного и поэтому запертая ранее лампа отпирается. После прихода следующего запускающего импульса снова происходит изменение состояния схемы. Лампы триггера периодически запираются и отпираются.

Блокинг-генератор. Для получения кратковременных периодических импульсов часто используется особый тип генератора импульсов, который носит название блокинг-генератора (фиг. 14).



Фиг. 14. Блокинг-генератор.
а — принципиальная схема; *б* — напряжение на выходе.

Блокинг-генератор представляет собой ламповый генератор с сильной обратной связью, которая осуществляется при помощи трансформатора со стальным сердечником.

Опишем кратко принцип действия блокинг-генератора.

При включении источника анодного питания в анодном контуре L_1—C_1 начинается синусоидальное изменение тока (в качестве емкости C_1 часто используется междувитковая емкость обмотки трансформатора). Вследствие наличия обратной связи напряжение на сетке лампы также начинает изменяться по синусоидальному закону. Первый положительный полупериод напряжения на сетке вызовет появление сеточного тока, который зарядит конденсатор C. Так как обратная связь берется сильной, а величина емкости C мала, то отрицательное смещение на сетке лампы достигнет величины, достаточной для прекращения анодного тока. Лампа закроется, и свободные колебания в контуре L_1—C_1 быстро затухнут.

Конденсатор C начнет разряжаться через сопротивление R. При этом отрицательное смещение на сетке лампы будет уменьшаться и, наконец, наступит такой момент, когда по анодной цепи лампы вновь сможет пройти кратковременный импульс анодного тока. После этого лампа снова закроется, и процесс повторится в описанной последовательности. Блокинг-генератор создает кратковременные периодические импульсы, частота повторения которых определяется постоянной времени цепи $R—C$ (фиг. 14,*б*).

Большим достоинством блокинг-генератора является то, что он позволяет получить импульсы различной длительности — от десятых долей микросекунды до сотен микросекунд при частоте повторения от нескольких герц до нескольких килогерц. При этом можно достигнуть очень большой крутизны фронта импульса.

Сложные и своеобразные процессы, происходящие при работе блокинг-генератора, были с наибольшей отчетливостью выявлены в трудах советских ученых.

Импульсный трансформатор. Трансформатор, осуществляющий обратную связь в блокинг-генераторе, существенно отличается от обычных трансформаторов напряжения звуковой частоты. На основании работ акад. Б. А. Введенского, посвященных исследованию процессов, происходящих в ферромагнитных материалах под воздействием внешнего магнитного поля, советскими учеными была разработана теория специального типа трансформаторов, которые предназначаются для передачи и преобразования импульсов длительностью в несколько микросекунд. Оказалось, что для неискаженной передачи импульсного напряжения при помощи трансформатора необходимо сводить до минимума паразитную емкость и индуктивность рассеяния обмоток трансформатора. Появились трансформаторы специальной конструкции, которые отличаются малым количеством пластин в сердечнике и имеют особую намотку катушек.

Импульсные трансформаторы нашли широкое применение в технике радиолокации, телевидения и импульсной радиосвязи.

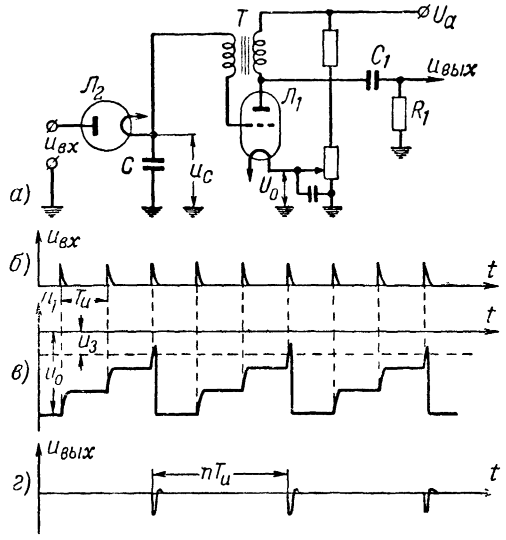
Делитель частоты повторения импульсов. При помощи блокинг-генератора можно из периодической последовательности импульсов, имеющих частоту повторения $F_и$, получить последовательность импульсов, повторяющихся с меньшей частотой $\frac{F_и}{n}$ (величину n назовем коэффициентом деления

частоты). На фиг. 15,*а* приведена схема делителя частоты повторения импульсов, собранная на блокинг-генераторе.

В сеточную цепь блокинг-генератора включены источник постоянного отрицательного смещения U_0 и конденсатор C, который может заряжаться положительными импульсами, поступающими на вход схемы.

Если конденсатор C полностью разряжен, то под воздействием напряжения U_0 лампа $Л_1$ оказывается полностью запертой.

Положительные импульсы, поступающие на конденсатор C (фиг. 15 *б*), производят ступенчатый заряд этого конденсатора (фиг. 15,*в*), в результате чего изменяется потенциал сетки лампы относительно земли. После прихода *n*-ного импульса отрицательное напряжение между сеткой и катодом лампы становится меньше напряжения запирания лампы $Л_1$.



Фиг. 15. Делитель частоты повторения импульсов.

а — принципиальная схема; *б* — входная последовательность импульсов; *в* — напряжение между сеткой и катодом лампы $Л_1$; *г* — выходная последовательность импульсов.

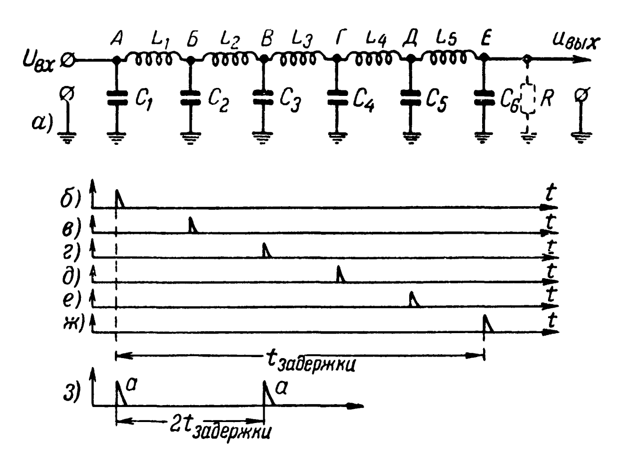
Блокинг-генератор срабатывает, и на выходе переходной цепи $R_1 - C_1$ получается кратковременный импульс напряжения (фиг. 15,*г*). Во время генерирования этого импульса по сеточной цепи лампы $Л_1$ проходит сеточный ток, который разряжает конденсатор C. Лампа $Л_1$ снова полностью запирается. Блокинг-генератор сможет выработать следующий импульс напряжения лишь после поступления *n* входных импульсов. Таким образом, частота повторения импульсов на выходе делителя частоты будет в *n* раз меньше, чем на его входе.

Задерживающая цепь $L - C$. Выше было показано, что ждущий мультивибратор можно использовать для задержки импульсов во времени. Эту же задачу можно выполнить

при помощи схемы, которая носит название задерживающей цепи $L—C$.

Задерживающая цепь $L—C$ состоит из ряда последовательно соединенных катушек индуктивности L_1, L_2 и т. д. и присоединенных к ним так, как показано на фиг. 16,*а*, конденсаторов C_1, C_2, C_3 и т. д.

Ток, текущий по катушке индуктивности, и напряжение на конденсаторе не могут изменяться скачком. Поэтому, если на вход задерживающей цепи подать кратковременный



Фиг. 16. Задерживающая цепь $L—C$.

а — принципиальная схема; *б* — *ж* — импульсы в различных точках схемы при отсутствии отражения от конца цепи; *з*—импульсы на входе цепи при наличии отражения от ее конца.

импульс напряжения, то вначале зарядится конденсатор C_1. Входной импульс напряжения закончится, но конденсатор C_1 начнет разряжаться через присоединенную к нему катушку L_1 на конденсатор C_2, тот, в свою очередь, будет разряжаться на конденсатор C_3 и т. д., пока импульс не дойдет до конца цепи задержки.

Если снимать напряжение с различных точек линии задержки *А*, *Б*, *В* . . . , то окажется, что оно будет иметь вид импульсов, задержанных во времени тем больше, чем дальше точка отвода от входа цепи задержки (фиг. 16,*б*, *в*, *г*...). Если цепь задержки заканчивается конденсатором, то после того, как импульс дойдет до конца цепи, через время $t_{задержки}$, начнется обратный разряд конденсатора C_6 на конденсатор C_5 и т. д., пока отраженный импульс не дойдет до

входа цепи. В результате этого напряжение на входе цепи задержки будет иметь вид сдвоенного импульса (фиг. 16,*з*). Второй импульс задерживается относительно первого на время, равное удвоенному времени задержки импульса $2t_{задержки}$.

Если на выходе цепи задержки поставить сопротивление R, то часть энергии импульса, дошедшего до конца цепи, превратится в тепло, выделяющееся на сопротивлении R, а часть энергии в виде отраженного импульса пойдет обратно к входу задерживающей цепи.

Сопротивление R можно выбрать таким образом, чтобы вся энергия импульса, дошедшего до конца цепи, поглощалась в нем. Отражение импульса от конца цепи к ее входу будет отсутствовать, если величина сопротивления R равна так называемому «волновому сопротивлению» задерживающей цепи ρ, которое зависит от параметров цепи L и C и вычисляется по формуле:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Обычно берут

$$C_1 = C_2 = \ldots = C \quad и \quad L_1 = L_2 = \ldots = L.$$

На практике применяют:

1) разомкнутую задерживающую цепь для получения сдвоенного импульса на ее входе;

2) задерживающую цепь, замкнутую на сопротивление $R = \rho$ для получения одиночного импульса, задержанного во времени.

Время задержки $t_{задержки}$ равно:

$$t_{задержки} = n\sqrt{LC},$$

где n — количество звеньев L—C в задерживающей цепи.

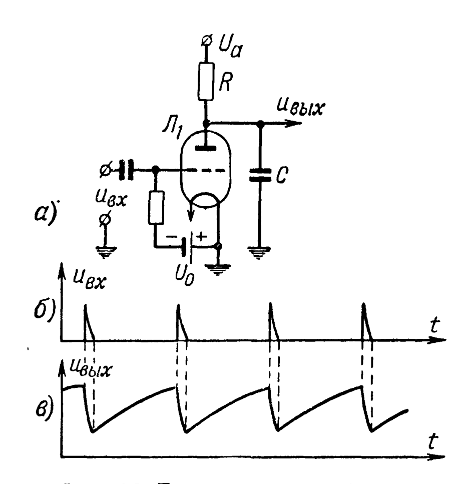
Теоретически и экспериментально было установлено, что цепи, состоящие из индуктивностей и емкостей, обладают формирующими свойствами: импульс на выходе цепи может быть получен почти прямоугольным. Это обстоятельство имеет большое значение при использовании видеоимпульсов для модуляции высокочастотных генераторов.

В заключение следует отметить глубокую принципиальную разницу между механизмом задержки импульсов с помощью цепи L—C и с помощью ждущего мультивибратора.

Ждущий мультивибратор, дополненный дифференцирующей цепью и ограничителем, вырабатывает новый импульс, задержанный во времени относительно пускового импульса.

Цепь L—C не вырабатывает новых импульсов, а просто задерживает во времени любой из импульсов, поступающих на ее вход.

Генератор пилообразного напряжения. В ряде импульсных устройств возникает необходимость в получении



Фиг. 17. Генератор пилообразного напряжения.

а — принципиальная схема; *б* — входная последовательность импульсов; *в* — напряжение на выходе.

пилообразного напряжения. Простейшая схема, выполняющая эту задачу, изображена на фиг. 17.

В отсутствие пускового импульса лампа $Л_1$ заперта, и конденсатор C заряжен до напряжения источника питания U_a.

В момент прихода запускающего импульса конденсатор быстро разряжается через лампу.

После окончания запускающего импульса снова начинается заряд конденсатора через сопротивление R.

Если постоянная времени цепи R—C достаточно велика, то заряд происходит почти по прямолинейному закону.

Таким образом, получается пилообразное напряжение, синхронизированное внешними пусковыми импульсами.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА В РАДИОЛОКАЦИИ

4. ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

В основе современной радиолокационной техники лежит явление отражения радиоволн от предметов, находящихся на пути их распространения. Это явление впервые было обнаружено великим русским ученым А. С. Поповым еще в 1897 г., но практическая реализация его открытия стала возможной лишь в 30-х гг. нашего столетия на базе технического опыта, накопленного радиотехникой. Возникла и стала бурно развиваться радиолокация — отрасль радиотехники, которая занимается разработкой методов определения координат различных объектов на суше, в море и в воздухе при помощи радиоволн.

Радиолокационные устройства находят разнообразное применение в народном хозяйстве и для научных исследований.

Радиолокационные станции применяются в метеорологии для наблюдения за движением радиозондов и перемещением дождевых фронтов, в астрономии — для наблюдения за метеорами, в радиофизике — для производства ионосферных измерений и т. д.

При помощи радиолокационной станции можно получить исчерпывающие данные о местонахождении отражающего объекта, т. е. узнать расстояние до него, азимут (угол между направлениями на север и на отражающий объект) и, наконец, высоту полета, если отражающим объектом является самолет. Определение азимута и высоты полета достигается за счет использования антенн направленного действия. Для определения расстояния до отражающего объекта применяется, как правило, импульсный метод работы радиолокатора, который основан на передаче и приеме очень коротких радиоимпульсов.

Непосредственное измерение расстояния до объекта заменяется в радиолокации измерением времени, необходимого радиоволнам для прохождения этого расстояния.

Импульс, излучаемый передатчиком (он называется прямым или зондирующим импульсом), и импульс, приходящий на вход приемника после отражения от объекта, нахо-

дящегося на пути распространения радиоволн, будут разнесены по оси времени на интервал t, равный:

$$t_{(мксек)} = 6{,}7\, R_{(км)}\ ^{*}),$$

где R — расстояние до отражающего объекта.

Время распространения электромагнитной энергии от радиолокатора до отражающего объекта и обратно чрезвычайно мало. Так, например, если расстояние до отражающего объекта $R = 100$ *км*, то время двойного хода радиолуча (до отражающего объекта и обратно к радиолокатору) составит всего лишь 670 *мксек*. Измерение столь малых промежутков времени удобнее всего производить с помощью электронно-лучевой трубки, которая позволяет довольно простыми средствами решить задачу наблюдения за процессами, происходящими в течение миллионных долей секунды, и измерить ничтожно малые, микросекундные, интервалы времени.

Следует вспомнить имена отечественных ученых, труды которых положили начало технике приема изображений на электронно-лучевую трубку.

Русский ученый, профессор Б. Л. Розинг еще в 1907 г. подал заявку на «Способ передачи изображений на расстояние» путем использования электронно-лучевой трубки. В этот же период Л. И. Мандельштам разработал схемы и методику изучения быстрых электрических колебаний с применением электронно-лучевой трубки. Современные методы индикации радиолокационных сигналов базируются на этих работах отечественных ученых.

Несмотря на разнообразие задач, выполняемых радиолокаторами импульсного типа, все они имеют примерно одинаковую скелетную схему (фиг. 18). Основными частями радиолокатора с импульсным излучением являются: *1* — синхронизатор; *2* — модулятор; *3* — генератор радиоимпульсов; *4* — антенная система; *5* — приемник отраженных радиоимпульсов; *6* — индикатор; *7* — генератор развертки индикатора.

Синхронизатор вырабатывает периодические видеоимпульсы (фиг. 18,*а*), которые управляют работой передат-

---

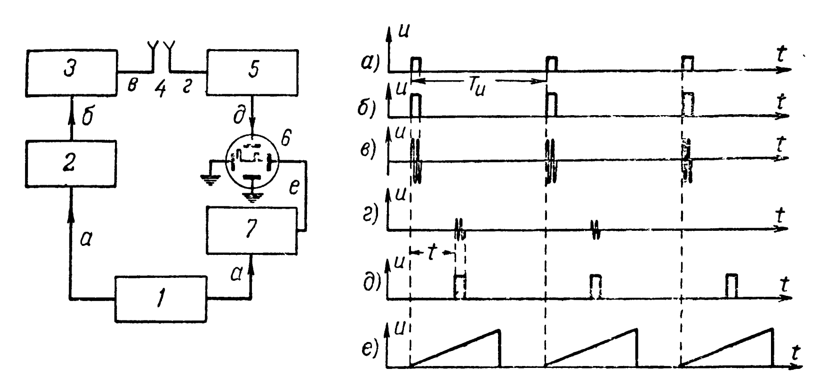
* Эта формула вытекает из соотношения

$$t = \frac{2R}{c},$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн, равная 300 000 *км/сек*.

чика и обеспечивают синхронность (одновременность) работы цепей передатчика и индикатора.

Видеоимпульсы синхронизатора, усиленные по напряжению и по мощности в цепях модулятора (фиг. 18,*б*) используются для периодического кратковременного отпирания ламп высокочастотного генератора, в результате чего происходит генерация мощных радиоимпульсов (фиг. 18,*в*), которые излучаются антенной в пространство в виде узкого пучка электромагнитной энергии. Одновременно с этим начинается рабочий цикл индикатора.



Фиг. 18. Блок-схема радиолокатора.

1 — синхронизатор; *2* — модулятор; *3* — генератор радиоимпульсов; *4* — антенная система; *5* — приемник отраженных радиоимпульсов; *6* — электронно-лучевая трубка; *7* — генератор пилообразного напряжения.

Отраженные радиоимпульсы (фиг. 18,*г*) улавливаются приемной антенной, усиливаются в каскадах приемника и детектируются, превращаясь в видеоимпульсы (фиг. 18,*д*), которые после дополнительного усиления поступают на индикатор. Индикатором называется тот узел радиолокационной станции, с помощью которого получается информация об отражающих объектах. В состав индикатора входит электронно-лучевая трубка и элементы ее питания. В случае применения электронно-лучевой трубки с электростатическим отклонением луча генератор развертки вырабатывает периодическое пилообразное напряжение (фиг. 18,*е*), подаваемое на пластины горизонтального отклонения электронного луча. На пластины вертикального отклонения подаются видеоимпульсы с выхода приемника. Генератор пилообразного напряжения запускается теми же импульсами синхронизатора, которые используются для модуляции

высокочастотного генератора. Появлению отраженного импульса соответствует всплеск на линии развертки.

В начале развертки располагается всплеск, соответствующий появлению зондирующего импульса (входные цепи приемника искусственно замыкаются накоротко во время излучения зондирующего импульса, но часть высокочастотной энергии все же попадает в тракт приемника ввиду несовершенства его экранировки). Временной интервал между передним фронтом всплеска, обозначающего зондирующий импульс, и всплеска, обозначающего отраженный импульс, пропорционален расстоянию до отражающего объекта.

Импульсные устройства, входящие в состав радиолокационной станции, должны обеспечить передачу и прием импульсных сигналов и нормальное взаимодействие отдельных элементов станции, а также возможность измерения промежутков времени длительностью в несколько микросекунд.

В табл. 1 указаны некоторые типы импульсных устройств, используемых в различных узлах радиолокационной станции.

Таблица 1

Типовые импульсные схемы, используемые в радиолокационной станции

Узел радиолокационной станции	Типовые импульсные схемы
Синхронизатор и схемы измерения времени .	Ограничители, мультивибраторы, блокинг-генераторы, дифференцирующие и задерживающие цепи
Модулятор	Задерживающие цепи $L-C$, импульсные трансформаторы, блокинг-генераторы
Передатчик	Схемы генерирования радиоимпульсов
Приемник	Усилители и преобразователи радиоимпульсов и усилители видеоимпульсов

Наиболее широкое и разнообразное применение импульсных схем встречается в синхронизаторе.

Поэтому при изложении наибольшее место уделим вопросам работы синхронизатора и тесно связанного с ним индикатора радиолокационной станции.

5. ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА В СХЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Основными задачами синхронизатора является задание частоты повторения зондирующих импульсов и координация работы передатчика и индикаторного устройства. Для выполнения этих задач прежде всего необходимо создать периодическую последовательность видеоимпульсов, которые назовем первичными импульсами.

Основное требование, предъявляемое к первичным импульсам, заключается в том, чтобы частота их повторений была равна той частоте, с которой необходимо посылать зондирующие импульсы[1]. Если такие импульсы получены, то, применяя те или иные импульсные схемы, можно так изменять длительность, амплитуду и форму первичных импульсов, чтобы получить нужные импульсы для управления модулятором и генератором развертки индикаторного устройства.

В качестве генератора первичных импульсов может быть выбрана любая из схем генераторов импульсов, описанных в гл. 1: 1) блокинг-генератор; 2) мультивибратор, дополненный дифференцирующей цепью и ограничителем или 3) генератор синусоидальных колебаний с амплитудным ограничителем и дифференцирующей цепью.

Другие задачи, возлагаемые на импульсные схемы, связаны с необходимостью создания «электрической» масштабной линейки для определения дальности в радиолокаторах повышенной точности. Поэтому необходимо остановиться на возможных методах измерения расстояния до объекта по экрану электронно-лучевой трубки.

Для того чтобы измерить расстояние до отраженного импульса, необходимо проградуировать линию развертки. Если напряжение, подаваемое на пластины горизонтального отклонения, имеет пилообразную форму, то приращение напряжения Δu за некоторое время Δt одинаково в любом месте линии развертки. Благодаря этому световая точка равномерно перемещается по экрану трубки. Если луч проходит всю длину линии развертки l за t *мксек*, то одному сантиметру линии развертки будет соответствовать $\frac{l}{t}$ *мксек*. Величину $\frac{l}{t}$ назовем скоростью развертки. Так как 1 *км* растояния до объекта, отражающего радиоволны, соответ-

[1] В частном случае эти частоты могут быть кратными.

ствует 6,7 *мксек* временного интервала между прямым и отраженным импульсами, то нетрудно подсчитать, что 1 *мксек* соответствует 150 *м*. Поэтому, окончательно 1 *см* линии развертки будет соответствовать расстоянию до отражающего объекта:

$$r_0 = \frac{t}{l} \cdot 150 \text{ м}.$$

Пример. Световое пятно проходит линию развертки $l = 5$ *см* за время 135 *мксек*.

Одному сантиметру линии развертки соответствует расстояние:

$$r_0 = \frac{135}{5} \cdot 150 \approx 4\,000 \text{ м}.$$

Таким образом, зная скорость развертки $\frac{l}{t}$, можно производить отсчет расстояний до отражающих объектов по целлулоидной или бумажной шкале, помещенной перед экраном электронно-лучевой трубки индикатора и проградуированной в километрах.

Однако никогда нельзя быть уверенным в том, что скорость развертки, определенная при начальной регулировке схемы, остается постоянной в течение всего времени работы радиолокатора. По тем или иным причинам могут изменяться напряжения источников питания, параметры ламп и величины сопротивлений, входящих в схему генератора пилообразного напряжения. Частая проверка градуировки шкалы расстояний отнимала бы значительное время, а в процессе работы все равно оставалась бы некоторая неуверенность в отношении точности сведений, доставляемых радиолокатором.

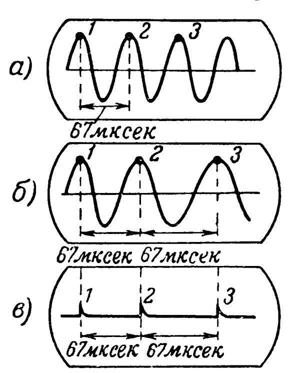
Для решения задачи точного определения расстояний можно использовать импульсные устройства.

Оказывается, что сам электронный луч может начертить на экране трубки очень точно калиброванную шкалу расстояний. Предположим, что в нашем распоряжении имеется высокостабильный генератор синусоидального напряжения, частота колебаний которого равна $F_0 = 15\,000$ *гц*. Если к пластинам горизонтального отклонения приложить пилообразное напряжение развертки, а на пластины вертикального отклонения подать это синусоидальное напряжение, то электронный пучок прочертит на экране синусоидальный

след (фиг. 19,*а*), расстояние между соседними вершинами которого будет равно периоду синусоиды T_0:

$$T_0 = \frac{1}{F_0} = \frac{1}{15\,000}\text{ сек} = 67 \text{ мксек.}$$

Но, так как 6,7 *мксек* соответствует расстоянию 1 *км*, то $T_0 = 67$ *мксек* соответствует расстоянию в 10 *км*. Таким образом, расстояние между соседними вершинами калиброванного синусоидального напряжения может быть использовано для измерения временных интервалов по экрану электронно-лучевой трубки. Этот способ измерений имеет одно важное преимущество. Расстояние между соседними вершинами синусоиды остается равным 6,7 *мксек* (10 *км*) при любом значении скорости развертки (фиг. 19,*б*). Поэтому, используя калибровочное синусоидальное напряжение для получения шкалы расстояний, можно не предъявлять особенно жестких требований к генератору пилообразного напряжения.



Фиг. 19. Электрическая масштабная линейка.

а — картина на экране трубки при равномерной развертке; *б* — то же при неравномерной развертке; *в* — масштабные метки при неравномерной развертке.

Синусоидальная кривая не может быть принята в качестве такой масштабной линейки, которая позволяла бы удобно и с большой степенью точности определять расстояния до отраженных импульсов. В самом деле, нужно иметь очень опытный глаз, чтобы определить точно, где находится вершина синусоиды. Поэтому желательно представить на экране трубки не всю масштабную синусоиду, а только ее отдельные точки *1*, *2*, *3*... расстояние между которыми составляет 67 *мксек* (10 *км*).

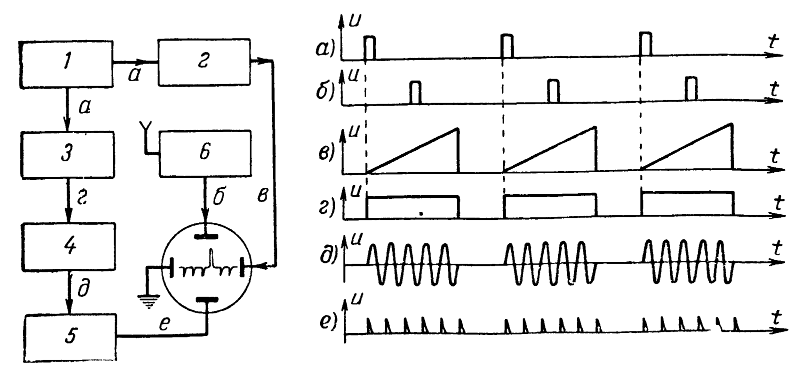
Еще будет лучше, если вместо точек *1*, *2*, *3*... мы увидим на экране вертикальные световые метки, соответствующие этим точкам (фиг. 19,*в*).

В таком случае «электрическая» масштабная шкала будет значительно удобнее целлулоидной или бумажной шкалы.

Заметим, что, изменяя частоту генератора F_0, можно выбрать расстояние между масштабными метками равным не только 10 *км*, но и любой другой величине. Так, например,

при $F_0 = 150$ *кгц* расстояние между соседними метками будет равно 1 *км*.

Для того чтобы на экране индикатора вместо кривой, изображенной на фиг. 19,*б*, появились масштабные метки, показанные на фиг. 19,*в*, необходимо преобразовать синусоидальное напряжение калибровочного генератора в короткие видеоимпульсы и подать их на пластины вертикального отклонения. Для выполнения этого преобразования



Фиг. 20. Получение электрической масштабной линейки.

1 — генератор первичных импульсов; *2* — генератор пилообразного напряжения; *3* — генератор прямоугольного напряжения; *4* — генератор синусоидального напряжения; *5* — схема формирования масштабных меток; *6* — приемник.

можно использовать, например, схему, изображенную на фиг. 20.

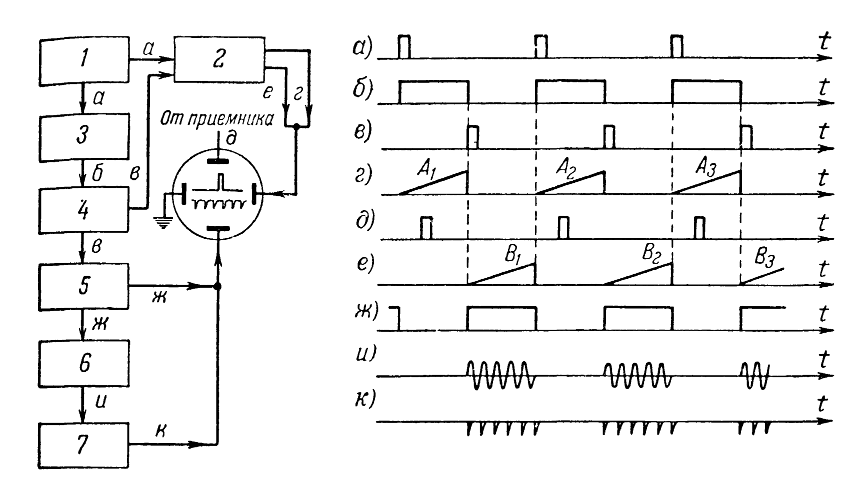
Практическое осуществление «электрической» масштабной линейки требует решения двух вопросов.

Во-первых, нужно синхронизировать генератор синусоидальных колебаний и генератор пилообразного напряжения развертки, иначе положение калибровочных отметок будет изменяться при каждом новом цикле развертки и не получится ясной картины на экране трубки.

Во-вторых, необходимо найти удобный способ одновременного наблюдения на экране трубки отраженных импульсов и калибровочных меток.

Для того чтобы решить задачу синхронизации, вводят дополнительный каскад *3* (фиг. 20), который запускается тем же импульсом, что и генератор пилообразного напряжения, и вырабатывает положительный (или отрицательный) прямоугольный импульс, равный по длительности пилообразному напряжению (фиг. 20,*г*). Этот прямоугольный импульс воздействует на генератор синусоидальных коле-

баний. Момент начала колебаний в контуре генератора каждый раз совпадает с моментом прихода первичного импульса синхронизатора (сравните фиг. 20,*а* и 20,*д*). Этим и обеспечивается жесткая связь между началом нарастания пилообразного напряжения и началом колебаний генератора синусоидального напряжения. После окончания действия пилообразного напряжения прямоугольный импульс (фиг. 20,*г*) также заканчивается, и колебания в контуре



Фиг. 21. Образование сдвинутой масштабной линейки.

1 — генератор первичных импульсов; *2* — генератор пилообразного напряжения, *3* — первая схема формирования прямоугольных импульсов. *4* — схема формирования задержанного пускового импульса, *5* — вторая схема формирования прямоугольных импульсов; *6* — генератор синусоидального напряжения; *7* — схема формирования масштабных меток.

генератора синусоидального напряжения *4* отсутствуют, пока вновь не повторится цикл развертки.

Если генератор синусоидального напряжения синхронизован с генератором пилообразного напряжения развертки, то расположение калибровочных методов для любого цикла развертки будет совершенно одинаковым.

Подавая напряжение калибровочных меток на пластины вертикального отклонения, увидим на экране трубки картину, изображенную на фиг. 19,*в*.

Для удобства отсчета электрическую масштабную линейку можно несколько сдвинуть по вертикали. Один из возможных вариантов осуществления этой операции представлен на фиг. 21.

Первичные импульсы синхронизатора (фиг. 21,*а*) задерживаются на полпериода при помощи ждущего мультивибратора и следующей за ним схемы формирования короткого импульса (фиг. 21,*б*, *в*).

Генератор пилообразного напряжения *2* срабатывает как от первичных импульсов синхронизатора (фиг. 21,*а*), так и от задержанных импульсов (фиг. 21,*в*). Однако во время периодов развертки A_1, A_2... и периодов развертки B_1, B_2... на пластины вертикального отклонения поступают разные сигналы.

В те периоды, когда развертка запускается первичными импульсами синхронизатора, на пластины вертикального отклонения подаются отраженные импульсы (фиг. 21,*д*), а в те периоды, когда развертка запускается задержанными импульсами, на пластины вертикального отклонения поступают импульсы масштабного напряжения (фиг. 21,*к*) и прямоугольный импульс (фиг. 21,*ж*).

Назначение прямоугольного импульса заключается в разделении сигнальной и масштабной разверток. За счет действия этого импульса вся линия масштабной развертки немного опускается вниз.

Если частота повторения первичных импульсов синхронизатора выше 12 ÷ 15 *гц*, то световое изображение на экране трубки будет устойчивым.

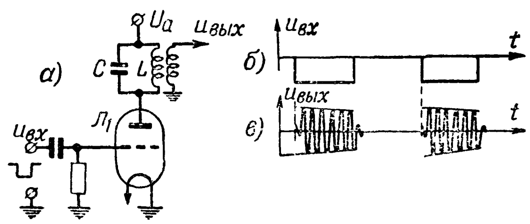
Приведенный пример убеждает нас в том, что за счет послесвечения экрана электронно-лучевой трубки можно получить одновременное изображение двух (или нескольких сигналов), которые в действительности существуют в разное время.

Такими сигналами в рассматриваемом случае являются отраженные импульсы и масштабные метки.

В некоторых радиолокаторах импульсы масштабного напряжения подаются не на пластины вертикального отклонения, а на управляющий электрод трубки. Если импульсы масштабных меток имеют отрицательную полярность, а амплитуда их достаточна для запирания трубки, то мы получим на линии развертки незасвеченные точки, расстояние между которыми соответствует 10 *км* (если F_0=15 *кгц*) при любой скорости развертки.

Точность измерения расстояний с помощью электрической масштабной шкалы во многом зависит от стабильности работы генератора синусоидального напряжения. Интересным методом получения высокостабильных колебаний является использование контура ударного возбуждения

(фиг. 22). Колебательный контур L—C включен в анодную цепь лампы $Л_1$. Когда лампа открыта, через катушку L проходит анодный ток лампы, постоянный по величине. Колебания в контуре отсутствуют, но в магнитном поле катушки запасена энергия. Импульсы, управляющие работой схемы, имеют отрицательную полярность и подаются на управляющую сетку лампы. В момент прихода импульса лампа запирается. В контуре L—C возникают затухающие колебания, частота которых определяется только параметрами контура L и C. В момент окончания отрицательного импульса лампа $Л_1$ открывается и, шунтируя колебательный контур, быстро заглушает колебания в нем.



Фиг. 22. Контур ударного возбуждения.
а — принципиальная схема; *б* — входное напряжение; *в* — выходное напряжение.

Частота свободных колебаний в эталонном контуре L—C отличается большой стабильностью, так как лампа не участвует в колебательном процессе, а сами параметры контура L и C достаточно стабильны.

Выходное напряжение используется для формирования калибровочных меток.

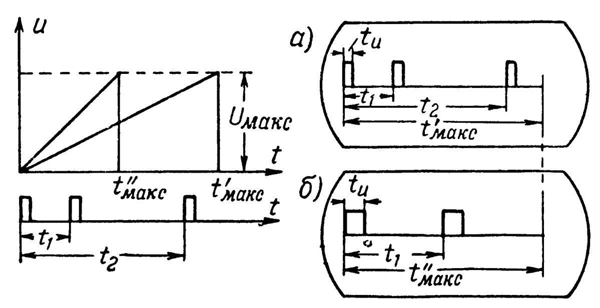
Мы рассмотрели один из способов определения расстояния до отражающего объекта. Следует отметить, что применение импульсных устройств в сочетании с электронно-лучевой трубкой позволяет чрезвычайно разнообразить способы индикации отраженных сигналов. Упомянем вкратце еще об одном из способов измерения расстояния, позволяющем увеличить точность отсчета. Способ этот заключается в «растяжке» небольшого участка линии развертки около отраженного импульса, что равноценно увеличению масштаба развертки.

Для получения «растянутой» развертки необходимо увеличить скорость нарастания пилообразного напряжения. Пусть $U_{макс}$ — такое напряжение, при котором световая точка находится в крайнем правом положении на экране трубки (фиг. 23).

Очевидно, что чем больше скорость нарастания пилообразного напряжения развертки, тем быстрее световая точка доходит до правого края экрана.

При малой скорости развертки на экране будут видны импульсы от объектов, для которых время прихода отраженных импульсов находится в пределах от 0 до $t'_{макс}$ (фиг. 23,*а*).

При увеличении скорости развертки масштаб увеличится, и на экране будут видны только импульсы от объектов, для которых время прихода меньше, чем в первом случае (фиг. 23,*б*). На основании этих рассуждений можно прийти



Фиг. 23. Ускорение развертки.
а и *б* — картины на экране трубки при различных скоростях развертки.

к выводу, что при помощи ускоренной развертки можно рассматривать только импульсы, отраженные от близких объектов.

Однако существует целый ряд способов «растяжки» любого, произвольно выбранного участка медленной развертки.

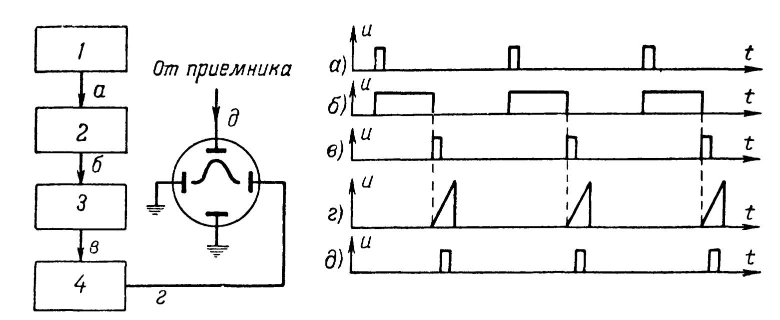
Один из способов (фиг. 24) заключается в том, что генератор пилообразного напряжения *4* запускается не от первичных импульсов синхронизатора (фиг. 24,*а*), а от задержанных импульсов (фиг. 24,*в*). Таким образом, начало ускоренной развертки искусственно перемещается в область, близкую к отраженному импульсу.

Изменяя время задержки запускающих импульсов, можно перемещать пилообразное напряжение быстрой развертки по диапазону расстояний, выбирая тот или иной из отраженных импульсов для подробного рассмотрения при быстрой развертке.

Рассмотрев только одну из задач, решаемых при помощи радиолокатора,— задачу измерения расстояния до объекта,

мы убедились в том, что в радиолокационных установках находят широкое применение амплитудные ограничители, мультивибраторы, генераторы пилообразных напряжений, дифференцирующие цепи, ждущие мультивибраторы, блокинг-генераторы и т. п.

Не рассматривая подробно вопросов, связанных с работой импульсных схем в остальных блоках радиолокатора, остановимся вкратце на некоторых особенностях импульсных схем, используемых в модуляторах. Задача модулятора заключается в формировании видеоимпульсов, имеющих



Фиг. 24. Образование ускоренной развертки.

1 — генератор первичных импульсов; 2 — ждущий мультивибратор; 3 — схема формирования задержанного импульса; 4 — генератор пилообразного напряжения.

амплитуду и мощность, достаточные для модуляции высокочастотного генератора.

Во многих практических случаях предъявляются жесткие требования к форме модулирующих видеоимпульсов, так как для существующих типов генераторов частота колебаний зависит от величины модулирующих напряжений. Для того чтобы частота не изменялась за время импульса, модулирующее напряжение должно, по возможности, приближаться к прямоугольной форме. Получение прямоугольных импульсов длительностью в несколько микросекунд может быть обеспечено с помощью схем ограничения и дифференцирования. Однако, если требуется работать очень короткими импульсами, то формирование прямоугольных импульсов большой мощности становится довольно трудной задачей.

Решение этой задачи заключается в использовании многозвенных цепей $L—C$ (фиг. 16), которые обладают способностью формировать короткие прямоугольные импульсы (до десятых долей *мксек*).

В схемах формирования импульсов при помощи цепей $L—C$, а также в схемах усиления видеоимпульсов находят широкое применение импульсные трансформаторы. Назначение их заключается в изменении амплитуд импульсных напряжений и в сочленении отдельных элементов схемы.

Таким образом, импульсные устройства выполняют важнейшие функции не только в синхронизаторе, но и в остальных узлах радиолокационной станции.

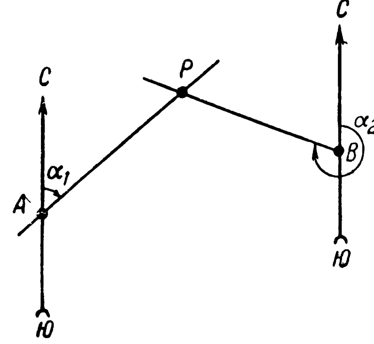
ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНИКА В РАДИОНАВИГАЦИИ

6. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Радионавигация — это отрасль радиотехники, которая занимается изучением методов вождения кораблей и самолетов с помощью радио.

Широко распространенным методом радионавигации является использование направленных свойств специальных типов передающих или приемных антенн. Важнейшая навигационная задача — определение местоположения корабля или самолета — при использовании этого метода сводится к нахождению угловых координат того объекта, местоположение которого определяется.



Фиг. 25. Определение местоположения объекта с помощью угломерной радионавигационной системы.

А и *В* — приемники с антеннами направленного действия; *Р* — передатчик с антенной ненаправленного действия.

Так, например, если на земле установлены приемные станции *А* и *В* (фиг. 25) с направленными антеннами, а на самолете — передающее устройство, то местоположение самолета можно определить путем нахождения угловых координат самолета относительно приемных станций (углы α_1 и α_2). Действительно, если углы α_1 и α_2 найдены, а расположение станций *А* и *В* известно, то положение самолета определяется, как точка пересечения прямых *АР* и *ВР*.

Радионавигационные системы, которые определяют угловые координаты объектов, называются угломерными.

Эти системы получили широкое распространение, однако даваемая ими точность определения координат в ряде случаев (в особенности на больших расстояниях) является недостаточной.

Поэтому встал вопрос о создании новых типов радионавигационных систем, обеспечивающих высокую точность определения координат кораблей и самолетов.

История новых систем радионавигации начинается с 1930—1932 гг., когда большая группа советских ученых-радиофизиков приступила к разработке точного метода исследования скорости распространения радиоволн.

Результаты исследований показали, что скорость распространения радиоволн вдоль земной поверхности не зависит от свойств почвы и всегда равна постоянной величине $c = 300\,000$ *км/сек*. Данное расстояние R электромагнитная энергия проходит за время t, равное:

$$t_{(сек)} = \frac{R_{(км)}}{300\,000}$$

вне зависимости от того, над каким участком земной поверхности происходит распространение радиоволн.

Проведенные исследования привели к возможности создания так называемых дальномерных и дальномерно-разностных радионавигационных систем, в которых при определении координат измеряются временные интервалы t, пропорциональные расстояниям R или разностям расстояний ΔR, а не угловые координаты, как в угломерных радионавигационных системах. Советский радиодальномер был первой в мире системой данного типа.

Точность определения координат с помощью таких систем значительно превосходит точность, даваемую угломерными радионавигационными системами.

В дальномерных радионавигационных системах используется как метод непрерывного излучения, так и метод импульсного излучения. Импульсные радионавигационные устройства являются одной из интереснейших областей применения достижений импульсной техники.

В сущности говоря, уже обычный радиолокатор можно использовать как радионавигационную систему, если сведения о местоположении корабля или самолета, полученные

с помощью радиолокатора, передавать по радио на этот корабль или самолет.

Однако такой метод в большинстве случаев является неприемлемым. От радионавигационной системы обычно требуется, чтобы она позволяла одновременно определять местоположение любого количества кораблей или самолетов. При использовании радиолокатора удовлетворение этого требования привело бы к необходимости иметь одновременно столько каналов радиосвязи, сколько кораблей (или самолетов) находится в данный момент в зоне действия радионавигационной системы.

Для получения большой пропускной способности радионавигационной системы используются импульсные устройства, значительно отличающиеся от радиолокационных.

Рассмотрим вкратце принцип действия одной из импульсных радионавигационных систем, которая называется дальномерно-разностной (или гиперболической) радионавигационной системой.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ДАЛЬНОМЕРНО-РАЗНОСТНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Для того чтобы понять, как при помощи дальномерно-разностной радионавигационной системы находится местоположение объекта, необходимо произвести некоторые геометрические построения.

На фиг. 26,*а* отмечены три точки земной поверхности A, B и C_0, лежащие на одной прямой. Допустим, что разность расстояний AC_0 и BC_0 равна некоторой величине ΔR:

$$\Delta R = AC_0 - BC_0 .$$

Выясним, нет ли еще на земной поверхности точек, для которых разность расстояний до точек A и B равна такой же величине. Фиг. 26,*б* дает ясный ответ на этот вопрос. Если отрезки AC_0 и BC_0 одновременно увеличивать на одну и ту же величину, то разности $AC - BC$, $AC_1 - BC_1$, $AC_2 - BC_2$ будут попрежнему равны величине ΔR. Другими словами, можно построить бесконечное множество треугольников ABC, ABC_1, $ABC_2 \ldots$ и т. д., у которых сторона AB одинакова, а разность двух других сторон равна некоторой вполне определенной величине ΔR. Вершины этих треугольников (C, C_1, $C_2 \ldots$ и т. д.) лежат на кривой, которая носит название гиперболы (кривая M).

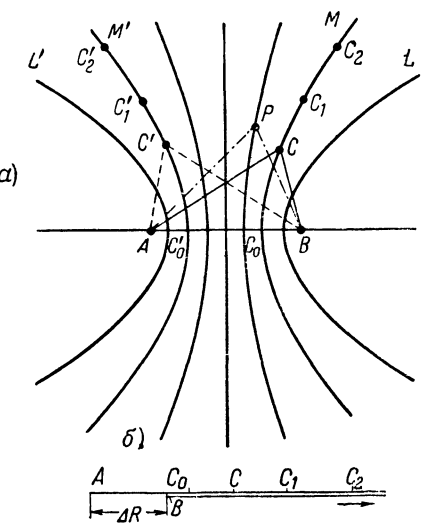
Основное свойство гиперболы заключается в том, что для каждой из ее точек (C, C_1, C_2... и т. д.) разность расстояний до двух фиксированных точек A и B остается постоянной. Точки A и B называются фокусами гиперболы.

В треугольнике ABC поменяем местами стороны AC и BC. Получим новый треугольник ABC' (фиг. 26,*а*), для которого

$$AC' = BC,\ BC' = AC.$$

Разность расстояний $BC' - AC'$ равна разности расстояний $AC - BC$:

$$BC' - AC' = AC - BC = \Delta R.$$



Фиг. 26. Семейство гипербол.

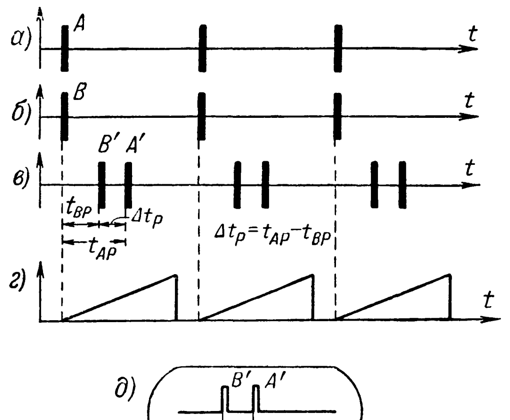
Отличие треугольника ABC' от треугольника ABC будет заключаться в том, что вершина C расположена к точке B ближе, чем к точке A, а вершина C' — к точке A ближе, чем к точке B. Подобно тому, как были построены треугольники ABC, ABC_1, ABC_2... и т. д., можно построить треугольники ABC', ABC_1', ABC_2'... и т. д., для каждого из которых справедливо условие:

$$BC' - AC' = BC_1' - AC_1' = BC_1'' - AC_2'' = \ldots = \Delta R.$$

Вершины этих треугольников будут лежать на новой гиперболе M', симметричной относительно гиперболы M. Различие между гиперболами M и M' заключается в том, что для всех точек гиперболы M расстояние до фокуса A больше, чем до фокуса B, а для всех точек гиперболы M' расстояние до фокуса A меньше, чем до фокуса B. Сходство между гиперболами M и M' заключается в том, что для каждой точки обеих гипербол разность расстояний до фокусов A и B равна одной и той же величине ΔR. Задавшись другим значением разности R, можно построить две других гиперболы L и L' (фиг. 26,*а*). Каждому значению разности ΔR соответствуют две вполне определенные гиперболы M и M', L и L'... и т. д. Совокупность гипербол,

имеющих фокусами данные точки A и B, называется семейством гипербол.

Покажем, что проведенная нами небольшая экскурсия в область геометрии имеет прямое отношение к принципу определения местоположения объекта при помощи дальномерно - разностной (гиперболической) радионавигационной системы.



Фиг. 27. Способ измерения временного интервала в дальномерно-разностной радионавигационной системе.

а — импульсы ведущей станции *A*; *б* — импульсы ведомой станции *B*; *в* — импульсы на входе приемника; *г* — пилообразное напряжение развертки; *д* — картина на экране трубки.

Представим себе, что в точках A и B находятся передатчики, которые работают на одинаковой частоте и одновременно излучают короткие периодически повторяющиеся импульсы (фиг. 27).

В точке P (фиг. 26,*а*) поместим приемник импульсных сигналов. Если расстояния AP и BP неодинаковы, то радиоимпульсы, одновременно излученные станциями A и B (фиг. 27,*а* и *б*), достигнут входа приемника, находящегося в точке P, в разные моменты времени (фиг. 27,*в*).

Импульс от станции A поступит на вход приемника через время $t_{AP} = \frac{1}{c} AP$ после его излучения, а импульс от станции B—через время $t_{BP} = \frac{1}{c} BP$ (c—скорость распространения радиоволн).

На выходе приемного устройства, находящегося в точке P, установим электронно-лучевую трубку. Предположим, что нам удалось тем или иным образом синхронизировать пилообразное напряжение (фиг. 27,*г*), развертывающее луч в горизонтальном направлении, с импульсами передающих станций A и B. Другими словами, предположим, что частота повторения импульсов пилообразного напряжения раз-

вертки равна частоте посылки импульсов передающих станций.

В этом случае импульсы, принятые от станций A и B, будут казаться на экране индикаторной трубки неподвижными относительно линии развертки (фиг. 27,*д*) [1].

Получив такую картину на экране трубки, оператор, находящийся в точке P (фиг. 26,*а*), может сказать, что он расположен к станции B ближе, чем к станции A (или наоборот) настолько, что разность хода радиоволн составляет величину:

$$t_{AP} - t_{BP} = \Delta t_P .$$

Переведя разность хода радиоволн в разность расстояний, можно сказать, что

$$AP - BP = c \cdot \Delta t_P .$$

Таким образом, измерив по экрану трубки временной интервал между импульсами A' и B', можно найти разность расстояний AP и BP.

При расположении приемника на гиперболе M (фиг. 26) импульс от станции B приходит раньше, чем от станции A, а при расположении на гиперболе M' — позже. Однако, если импульсы станций A и B одинаковы по форме и по длительности, то оператор не будет знать, какой из этих импульсов приходит раньше, а какой — позже, и не сможет определить, находится ли он на гиперболе M или же на гиперболе M' Можно предложить различные способы устранения этой неопределенности, например, сделать импульсы станций A и B неодинаковыми по длительности или сделать импульс одной из станций двойным. Однако можно предложить еще один способ для устранения неопределенности в определении гиперболы, на которой находится приемная станция. Этот способ заключается в создании искусственной временной задержки импульсов одной из станций.

Рассматривая временные диаграммы, изображенные на фиг. 28, можно убедиться в том, что при введении временной задержки импульса станции B (на время $t_з$) временной интервал между импульсами в точке приема становится равным величине $\Delta t'_p$, связанной с временным интер-

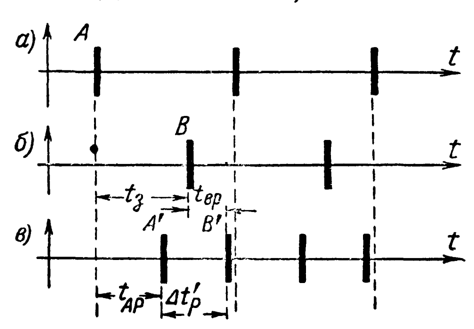
---

[1] На фиг. 27, *а*, *б*, *в* изображены радиоимпульсы, а на фиг. 27, *д* — видеоимпульсы, полученные на выходе приемника.

валом Δt_p (полученным при отсутствии задержки) соотношением

$$\Delta t_p' = t_з - (t_{AP} - t_{BP}).$$

В зависимости от расположения точки приема P относительно передатчиков A и B разность времени $t_{AP} - t_{BP}$, пропорциональная разности расстояний AP и BP, может быть положительной или отрицательной. Для двух симметричных гипербол M и M' величины $\Delta t_p'$ будут различными. Действительно, если точка P лежит на гиперболе M, то $AP > BP$ и, следовательно, $t_{AP} > t_{BP}$, т. е. величина $t_{AP} - t_{BP}$ положительная. Для гиперболы M' справедливы неравенства: $AP' < BP'$ и $t_{AP'} < t_{BP'}$, т. е. величина $t_{AP'} - t_{BP'}$ отрицательная.



Фиг. 28. Измерение временного интервала при наличии задержки импульсов ведомой станции.

а — импульсы ведущей станции; *б* — задержанные импульсы ведомой станции; *в* — импульсы на входе приемника.

Поэтому при введении временной задержки между импульсами передающих станций во всем семействе гипербол не будет двух кривых, для которых временный интервал между принимаемыми импульсами $\Delta t_p'$ был бы одинаковым (фиг. 29).

Каждая из гипербол как бы приобретает свое собственное „имя“, которое нельзя спутать с „именами“ других гипербол.

Если теперь на географической карте отметить точки расположения передатчиков A и B и при заданном значении времени задержки $t_з$ вычертить семейство гипербол[1] (фиг. 29), то оператор приемной станции, вычислив временной интервал между принятыми импульсами A' и B', может сразу сказать, на какой из гипербол он находится.

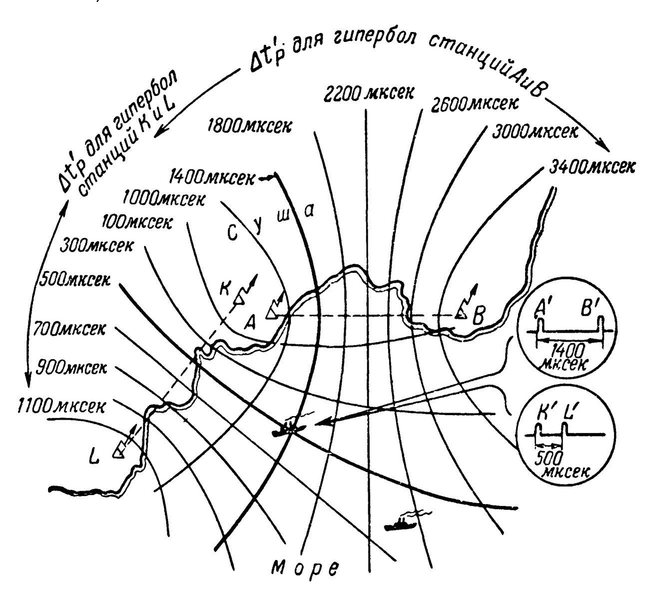
Однако при наличии двух передающих станций еще нельзя определить местоположение приемной станции. Она

[1] При учете кривизны земной поверхности кривые несколько отличаются от гипербол.

может находиться в любой точке найденной гиперболы. Поэтому необходимо дополнить радионавигационную систему еще одной парой передающих станций K и L (фиг. 29). Тогда определение местоположения корабля (или самолета) сведется к двум операциям:

1) определение гиперболы, образованной станциями A и B (в примере найдена гипербола, для которой $\Delta t'_p = 1\,400$ *мксек*);

2) определение гиперболы, образованной станциями K и L (в примере найдена гипербола, для которой $\Delta t'_p = 500$ *мксек*).



Фиг. 29. Определение местоположения приемной станции при помощи дальномерно-разностной радионавигационной системы.

Корабль или самолет, на котором установлен приемник, будет находиться в точке пересечения найденных гипербол P *.

Так как в основе определения местоположения лежит принцип измерения разностей расстояний, то радионавигационная система называется дальномерно-разностной.

* Расположение передающих станций выбирается таким образом, чтобы вторая точка пересечения гипербол находилась вне района возможного расположения приемной станции.

Опе пары станций могут работать на одной и той же несущей частоте. Для того чтобы импульсы одной пары станций не мешали производству измерений при работе с другой парой станций, частоты повторения импульсов для отдельных пар станций выбираются несколько различными. При этом развертка приемного индикатора может быть синхронизирована только с импульсами одной пары станций. Импульсы другой пары станций будут перемещаться по экрану, оставляя на нем бледный след, не мешающий производству отсчетов.

В каждой паре станций одна из станций является ведущей, а другая — ведомой.

Сначала излучает импульс ведущая станция. Ведомая станция принимает этот импульс, задерживает его на определенное время и только после этого излучает в пространство.

Передающие антенны наземных станций излучают электромагнитную энергию во всех направлениях. Поэтому их сигналы могут быть использованы для определения местоположения любого корабля или самолета, находящегося в пределах дальности действия наземных передатчиков. Сигналами наземных станций может пользоваться одновременно неограниченное количество кораблей или самолетов. Это обстоятельство является весьма важным свойством дальномерно-разностной радионавигационной системы.

8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СХЕМ В ДАЛЬНОМЕРНО-РАЗНОСТНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

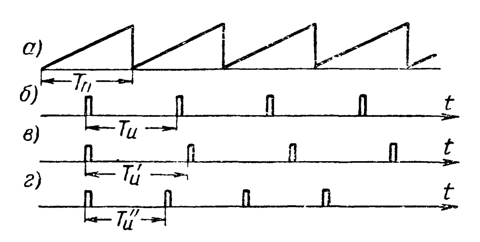
Рассмотрим примерное устройство приемной станции и ознакомимся с техникой измерения временного интервала между импульсами. Вначале остановимся на одном вспомогательном вопросе, ясное понимание которого будет важно в дальнейшем.

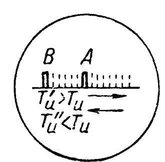
Пусть на горизонтально-отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки подается пилообразное напряжение (фиг. 30, *а*), а на вертикально-отклоняющие пластины — периодическая последовательность импульсов сигнала. Если период повторения импульсов $T_и$ равен периоду повторения пилообразного напряжения $T_п$ (фиг. 30, *б*), то сигнальные импульсы во время каждого цикла развертки попадают в одно и то же место трубки и кажутся на экране неподвижными,

Если $T_u' > T_n$ (фиг. 30, *в*), то сигнальные импульсы „бегут“ по экрану вправо, если же $T_u'' < T_n$ (фиг. 30, *г*), то они бегут по экрану влево. Изменяя частоту повторения импульсов сигнала, можно добиться их синхронизации с развертывающим напряжением.

Пусть такая синхронизация осуществлена, и импульсы сигнала остановились в некоторой точке экрана *А*.

Для того чтобы перевести их в другую точку экрана *В*, нужно несколько изменить частоту повторения импульсов. Импульсы начнут перемещаться по экрану. В тот момент, когда импульс дойдет до нужной нам точки экрана *В*, быстро изменим частоту повторения импульсов, сделав ее равной частоте пилообразного напряжения развертки. Тогда импульс сигнала остановится в точке экрана *В*.





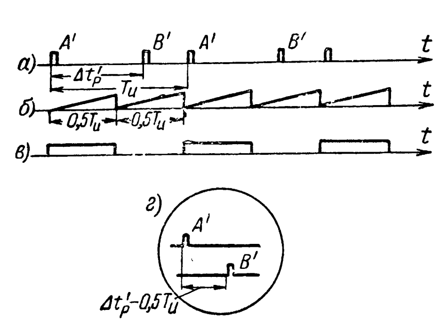
Фиг. 30. Синхронизация изображения в дальномерно-разностной радионавигационной системе.

Если частота повторения импульсов сигнала является заданной, то описанную выше операцию остановки импульса на экране и перевод его из одной точки экрана в другую можно производить, изменяя частоту пилообразного напряжения развертки.

Сделав это предварительное замечание, в качестве примера вкратце ознакомимся с типовым приемно-индикаторным устройством дальномерно-разностной радионавигационной системы.

Частоту повторения импульсов для одной пары станций возьмем равной 25 *гц*, а для другой пары несколько больше (например, 35 *гц*). Рассмотрим работу приемно-индикаторного устройства при приеме сигналов первой пары станций ($F_u = 25$ *гц*, $T_u = 40\,000$ *мксек*). Время искусственной задержки импульсов на ведомой станции выберем таким образом, чтобы для любой гиперболы величина ин-

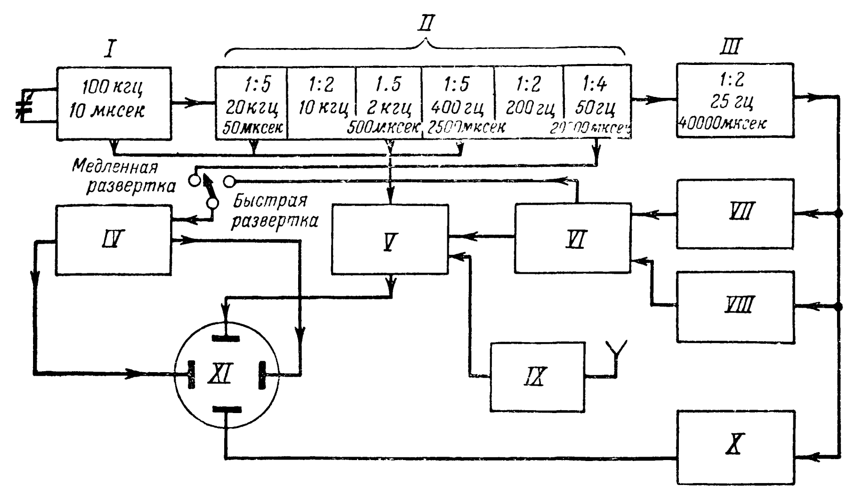
тервала $\Delta t'_p$ была больше половины периода повторения импульсов (т. е. при $T_u = 40\,000$ *мксек* должно соблюдаться условие $\Delta t'_p > 20\,000$ *мксек*) (фиг. 31, *а*). Период повторения пилообразного напряжения, развертывающего луч приемной трубки, возьмем равным 20 000 *мксек* (фиг. 31, *б*). Произведем разделение четных и нечетных периодов разверток при помощи прямоугольных импульсов, прикладываемых к пластинам вертикального отклонения (фиг. 31, *в*). При этом на экране трубки будут прочерчиваться одна под другой две линии развертки длительностью по 20 000 *мксек* (фиг. 31, *г*). Соединим выход приемника с пластинами вертикального отклонения трубки. Так как временной интервал $\Delta t'_p$ превосходит 20 000 *мксек*, то импульсы ведущей и ведомой станции всегда будут располагаться на разных линиях развертки — один на верхней, другой — на нижней. Если длительность пилообразного напряжения в точности равна половине периода повторения импульсов передающей станции, то импульсы стоят неподвижно на экране трубки. Можно произвести отсчет временного интервала между ними. Этот временной интервал, как нетрудно убедиться, равен величине $\Delta t'_p - 0{,}5\,T_u$, а не полной величине $\Delta t'_p$. Однако это обстоятельство не может привести к ошибке при определении гиперболы, на которой находится приемник, если только на карте с гиперболической сеткой уменьшить все действительные величины временных интервалов $\Delta t'_p$ на одну и ту же величину $0{,}5\,T_u$.



Фиг. 31. Получение двустрочной развертки в дальномерно-разностной системе.

На фиг. 32 представлена блок-схема приемно-индикаторного устройства. Для того чтобы обеспечить высокую стабильность частоты развертки, применяется специальная схема синхронизации. Первичным элементом схемы является независимый кварцевый генератор, работающий на часто-

те 100 *кгц*. Из синусоидального напряжения этого генератора формируется последовательность импульсов с периодом повторения 10 *мксек* (частота повторения—100 *кгц*). Эти импульсы подаются на вход многокаскадного делителя частоты на блокинг-генераторах. После последовательного деления частоты на 5, 2, 5, 5, 2, 4 и 2 получаются импульсы с частотой



Фиг. 32. Блок-схема приемно-индикаторного устройства дальномерно-разностной радионавигационной системы.

I—кварцевый генератор и схема формирования импульсов; *II* — делители частоты; *III* — генератор прямоугольных импульсов; *IV* — генератор пилообразного напряжения; *V* — смеситель; *VI* — формирование пьедесталов $П_1$ и $П_2$, *VII* — задержка ведущего пьедестала $П_1$, *VIII* — задержка ведомого пьедестала $П_2$, *IX* — приемник; *X* — разделитель разверток, *XI* — индикатор.

повторения, равной 25 *гц* (период повторения 40 000 *мксек*), которые используются для формирования прямоугольных импульсов, производящих разделение разверток. Генератор пилообразного напряжения при медленной развертке запускается импульсами, имеющими частоту повторения 50 *гц*. Непосредственно после включения приемника импульсы станций *А* и *В* бегут по экрану. Подстраивая кварцевый генератор, можно добиться того, чтобы частота пилообразного напряжения развертки стала в точности равна половине частоты повторения импульсов передающих станций. Тогда импульсы *А* и *В* остановятся. Описанным выше методом можно добиться перевода импульса *А* в начало верхней линии развертки. Импульс *В* будет располагаться где-то справа на нижней линии развертки.

Для получения электрической масштабной линейки используются импульсы с выхода нескольких каскадов делителя частоты.

На пластины вертикального отклонения после смешения поступают масштабные импульсы, имеющие период повторения 10, 50, 500 и 2 500 *мксек*, которые и служат для образования масштабной линейки. Так как все эти импульсы образуются из напряжения кварцевого генератора, используемого для формирования синхронизирующих импульсов развертки, то масштабная линейка будет неподвижна относительно линии развертки.

Временной интервал между импульсами можно было бы измерить сразу после включения электрической масштабной линейки. Однако такой способ измерений имеет существенные недостатки. Во-первых, точность измерений будет низкой, так как при длительности развертки 20 000 *мксек* даже относительно длинные импульсы (например, 50 *мксек*) имеют вид сплошных вертикальных штрихов. Определить передний фронт импульса не представляется возможным. Кроме этого, масштабная линейка будет искажена и размыта за счет воздействия шумов приемника. Поэтому для точного измерения расстояний практикуется метод совмещения очертаний импульсов при ускоренной развертке. Поясним идею этого метода.

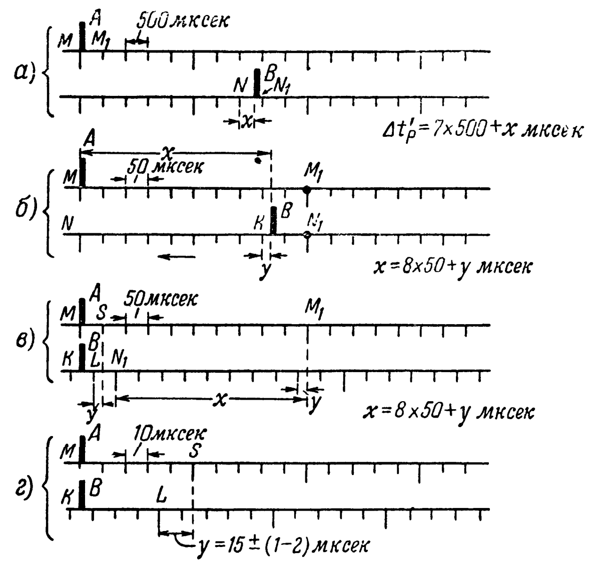
Если изображение рассматривать при медленной развертке, длительность которой равна 20 000 *мксек*, то на экране отчетливо будут видны только масштабные метки «2 500» и «500» *мксек* (фиг. 33,*а*). Более мелкие масштабные метки сливаются в сплошную линию.

Для простоты рассуждений предположим, что импульс станции *А* совпадает с отметкой 2 500 *мксек* *. Подсчитав полное количество 500-микросекундных интервалов, укладывающихся между импульсами *А* и *В*, мы произведем измерение с точностью до 500 *мксек*. Для случая, изображенного на фиг. 33,*а*, измеряемый интервал времени равен 3 500 + x *мксек*. Для того чтобы произвести измерение остатка x, необходимо подробно рассмотреть небольшой участок линии развертки, окружающий импульсы *А* и *В*. Представим себе, что нам удалось на верхней и нижней линиях развертки вырезать участки длительностью по

* Вместо импульсов *А* и *В* на фиг. 33 отмечаются только положения их передних фронтов.

750 *мксек* (фиг. 33,б). Каждый из этих участков будет содержать по две 500-микросекундных метки.

Произведя растяжение обоих участков при помощи ускоренной развертки, совместим левые 500-микросекундные метки верхнего и нижнего участков M и N (фиг. 33,*б*). Так как теперь на экране отчетливо будут видны 50-микросекундные метки, то можно произвести измерение временного интервала с точностью до 50 *мксек*.



Фиг. 33. Принцип измерения временного интервала при помощи ускоренных разверток.

Для нашего примера $x = 400 + y$ *мксек*.

Измерение временного интервала целесообразно производить при отключенном приемнике. Эту задачу можно решить следующим образом. Предположим, что нам удалось передвинуть нижнюю линию развертки относительно верхней настолько, чтобы импульс B совпал на экране трубки с импульсом A (фиг. 33,*в*).

Очевидно, что при этом масштабная линейка нижней линии развертки сместится влево на расстояние x. Вследствие этого временной интервал между правыми 500-микросекундными метками верхней и нижней масштабной шкалы M_1 и N_1 станет равен величине x. Поэтому после совмещения импульсов A и B можно выключить приемник и произ-

вести измерение интервала времени x по расстоянию между 500-микросекундными метками M_1 и N_1.

Результат будет прежним:

$$x = 400 + y.$$

Обратившись к фиг. 33,*в*, заметим, что величина y равна временному интервалу между 50-микросекундными метками S и L, ближайшими к началу развертки. Для точного измерения величины y можно еще больше увеличить скорость развертки. Так, например, если общая длительность развертки станет равной 200 *мксек*, то на экране будут отчетливо видны 10-микросекундные метки (фиг. 33,*г*). При этом можно достигнуть точности отсчета величины y, равной $1 \div 2$ *мксек*. В нашем примере $y = 15 \pm (1 \div 2)$ *мксек*. Таким образом, временной интервал между импульсами A и B будет равен:

$$\Delta t'_p = 3\,500 + x + y \pm (1 \div 2) \text{ мксек} = 3\,500 + 400 + 15 \pm (1 \div 2) \text{ мксек} = 3\,915 \pm (1 \div 2) \text{ мксек}.$$

В наших рассуждениях вместо действительных импульсов станций A и B рассматривались штрихи, соответствующие переднему фронту каждого импульса.

В действительности, по мере увеличения скорости развертки представляется возможным все более точно совместить очертания обоих импульсов. Заметим еще, что если бы передний фронт импульса станции A не совпадал с 500-микросекундной меткой, это не повлияло бы на результат измерений величин x и y, так как при перемещении импульса A относительно начала развертки одновременно перемещается и жестко связанный с ним во времени импульс станции B.

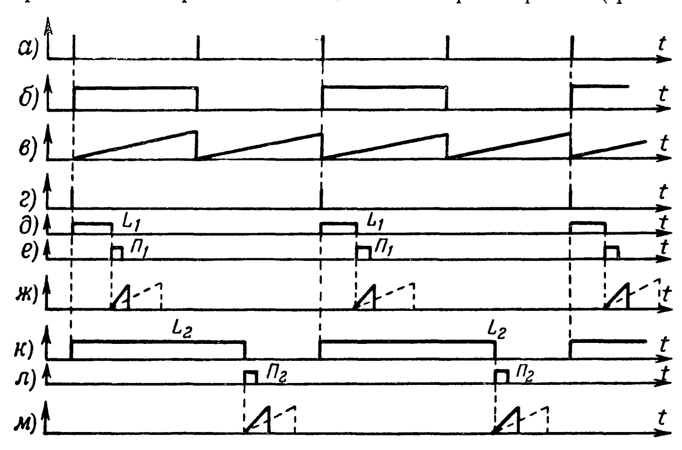
Для получения ускоренных разверток используются два вспомогательных импульса, которые носят название «пьедесталов». Один из них называется пьедесталом ведущей станции $П_1$, другой — пьедесталом ведомой станции $П_2$.

Формирование пьедестала $П_1$ производится следующим способом (фиг. 34).

Прямоугольные импульсы, используемые для разделения разверток ($F_и = 25$ *гц*, $T_и = 20\,000$ *мксек*), дифференцируются. Короткий импульс, соответствующий переднему фронту (фиг. 34,*г*), используется для запуска ждущего мультивибратора, вырабатывающего вспомогательные прямоугольные импульсы L_1 (фиг. 34,*д*). Эти импульсы, в свою

очередь, дифференцируются. Короткий импульс, соответствующий заднему фронту, используется для запуска второго ждущего мультивибратора, вырабатывающего прямоугольный импульс—пьедесталы $П_1$, длительностью 150 *мксек* (частота повторения — 25 *гц*) (фиг. 34,*е*).

Изменяя длительность вспомогательных импульсов L_1, можно перемещать пьедестал $П_1$ относительно начала пилообразного напряжения медленной развертки (фиг. 34,*в*).



Фиг. 34. Образование пьедесталов и ускоренных разверток.

Обычно передний фронт пьедестала ведущей станции совмещают с ближайшей к началу развертки 500-микросекундной меткой.

Аналогичным способом производится формирование пьедестала $П_2$ (фиг. 34,*к*, *л*). Длительность вспомогательного импульса L_2 может изменяться в пределах от 20 000 до 32 000 *мксек*. Это соответствует смещению пьедестала ведомой станции $П_2$ по нижней развертке от положения непосредственно под пьедесталом ведущей станции до 12 000 *мксек* вправо.

Такое перемещение заведомо перекрывает возможные значения временного интервала между импульсами станций *А* и *В*.

Генератор пилообразного напряжения при действии ускоренных разверток запускается в моменты возникновения пьедесталов $П_1$ и $П_2$ (фиг. 34,*ж*, *м*).

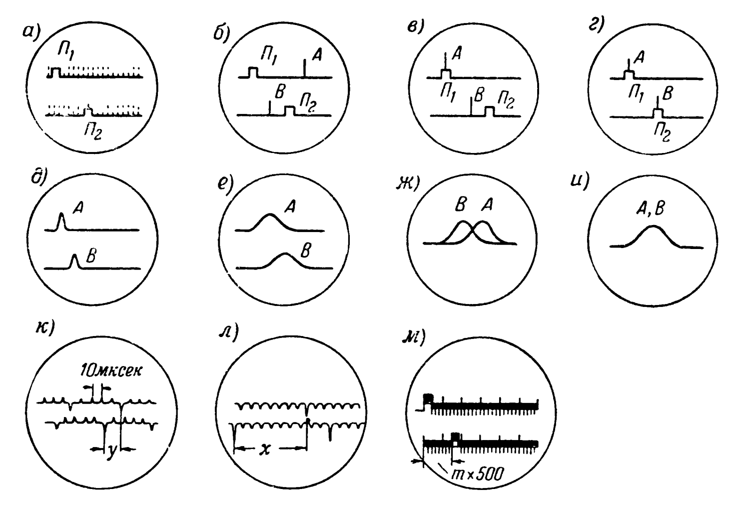
Длительности ускоренных разверток могут быть взяты равными 750 и 200 *мксек*.

Линия развертки, соответствующая пилообразному напряжению фиг. 34,*ж*, лежит выше линии развертки, соответствующей пилообразному напряжению, фиг. 34,*м*, так как на пластины вертикального отклонения подаются прямоугольные положительные импульсы (фиг. 34,*б*) для разделения разверток.

Процесс измерения временного интервала $\Delta t_p'$ состоит из двух операций:

1) совмещение импульсов станций *А* и *В* на экране индикатора (при выключенной масштабной линейке);

2) отсчет временного интервала по масштабной линейке (при отключенном приемнике).



Фиг. 35. Последовательность операций при измерении временного интервала.

В момент включения приемно-индикаторного устройства пьедестал $П_1$ располагается в начале верхней развертки, а пьедестал $П_2$ занимает некоторое произвольное положение на нижней развертке (фиг. 35,*а*). Импульсы станций *А* и *В* бегут по экрану. Масштабная линейка выключена. Изменяя подстроечным конденсатором частоту колебаний кварцевого генератора, добьемся того, чтобы импульсы *А* и *В* остановились (фиг. 35,*б*). Путем скачкообразного изменения частоты кварцевого генератора переведем импульс *А* на пьедестал $П_1$. Импульс станции *В* при этом окажется где-то справа на нижней развертке (фиг. 35,*в*). Затем,

изменяя время задержки пьедестала $П_2$, подведем его под импульс станции *B* (фиг. 35,*г*). Теперь произведем операцию точного совмещения очертаний импульсов *A* и *B*.

Для этого, как было показано выше, необходимо вырезать участки линий развертки, окружающие импульсы *A* и *B*, и растянуть их путем увеличения скорости развертки.

Как уже сказано, при работе в режиме ускоренной развертки генератор пилообразного напряжения запускается не от синхронизирующих импульсов (фиг. 34,*а*), а от коротких импульсов, соответствующих передним фронтам пьедесталов $П_1$ и $П_2$ (фиг. 34,*ж*, *м*). Так как длительность каждого пьедестала равна 150 *мксек*, то при размещении импульсов *A* и *B* над пьедесталами (фиг. 35,*г*) можно быть уверенным в том, что даже при самой быстрой развертке (длительностью 200 *мксек*) импульсы *A* и *B* останутся в пределах экрана трубки.

Вначале импульсы рассматриваются на развертке длительностью 750 *мксек* (фиг. 35,*д*).

При изменении временной задержки пьедестала $П_2$ смещается по времени начало быстрой развертки, соответствующей пилообразному напряжению, показанному на фиг. 34,*м*. При этом изменяется положение импульса *B* относительно начала развертки. Поэтому, изменяя время задержки пьедестала $П_2$, можно подвести импульс *B* под импульс *A* (фиг. 35,*д*). На фиг. 33 это соответствует выполнению операции 33,*в*, но при выключенной масштабной линейке.

После того как импульс *B* подведен под импульс *A*, включим ускоренную развертку длительностью 200 *мксек* (фиг. 35,*е*). Это соответствует выполнению операции 33,*г* на фиг. 33.

Произведем точное совмещение очертаний импульсов *A* и *B*. Для этого выключим разделитель разверток (фиг. 35,*ж*) и, изменяя время задержки пьедестала $П_2$, добьемся точного совмещения импульсов (фиг. 35,*и*).

Теперь можно отключить приемник и, включив электрическую масштабную линейку, произвести измерение временного интервала $\Delta t'_p$ *. Измерение временного интервала $\Delta t'_p$, равного целому числу 500-микросекундных меток плюс $x+y\pm(1\div2)$ *мксек*, производится в порядке, обратном вышеописанному.

* Разделитель разверток снова включается.

1) при быстрой развертке длительностью 200 *мксек* измеряется величина y (фиг. 35,*к*);

2) при быстрой развертке длительностью 750 *мксек* измеряется величина x (фиг. 35,*л*);

3) при медленной развертке длительностью 20 000 *мксек* находится полное количество 500-микросекундных отрезков, путем измерения временного интервала между передними фронтами пьедесталов $П_1$ и $П_2$ (фиг. 35,*м*).

Найденное значение величины $\Delta t'_p$ отыскивается на гиперболической сетке, и находится первая гипербола положения (фиг. 29). Затем производится переключение индикаторного устройства для работы со второй парой станций и находится вторая гипербола положения. Местоположение станции определяется как точка пересечения гипербол P.

На производство всей операции опытный оператор затрачивает 2—3 мин.

Кварцевый генератор, применяемый в схеме индикаторного устройства, обладает высокой стабильностью частоты.

Поэтому за время, необходимое для производства измерений, импульсы станций A и B можно считать практически неподвижными относительно линии развертки.

На передающих станциях для увеличения стабильности частоты повторения импульсов также применяются кварцевые генераторы и делители частоты повторения импульсов.

Передающее устройство ведущей станции состоит из синхронизатора, модулятора и передатчика, причем синхронизатор содержит кварцевый генератор на 100 *кгц* и схему деления частоты, обеспечивающую получение периодической последовательности импульсов с частотами повторения 25 или 35 *гц*.

Передающее устройство ведомой станции состоит из синхронизатора, блока задержки импульса, модулятора, передатчика и контрольного устройства, включающего приемник и индикатор с электронно-лучевой трубкой. На вход приемника поступают сигналы ведущей станции и искусственно задержанные сигналы ведомой станции, которые наблюдаются на экране электронно-лучевой трубки. Измерение временного интервала между этими импульсами производится при помощи электрической масштабной линейки, образуемой путем подачи на индикаторную трубку импульсов от блока деления частоты.

Оператор ведомой станции следит за синхронностью импульсов ведущей и ведомой станции и поддерживает посто-

янство времени задержки импульса ведомой станции. Первая задача выполняется путем регулировки частоты кварцевого генератора, а вторая — путем изменения времени задержки.

Рассмотрев схему дальномерно-разностной радионавигационной системы, можно убедиться в том, что импульсные схемы и в этом случае являются существенными элементами передающего и приемного устройства.

Основная задача, которая выполняется импульсными устройствами, входящими в состав радиолокационных станций и радионавигационных систем, заключается в обеспечении точного измерения временных интервалов, пропорциональных расстояниям.

Однако этим не исчерпывается тот круг технических вопросов, которые могут быть решены с помощью импульсных устройств. Перейдем к рассмотрению вопроса о способах осуществления радиосвязи с помощью импульсов.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ

9. ПРИНЦИПЫ ИМПУЛЬСНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Уже в годы первых сталинских пятилеток развитие радиосвязи и радиовещания в Советском Союзе достигло столь высокого уровня, что стала ощущаться заметная «теснота» в эфире. Из года в год возрастало количество передаваемых радиограмм. Радио все глубже проникало во все области хозяйственной и культурной жизни великой страны социализма. Перед советскими учеными и инженерами встала важная задача — изыскать способы увеличения пропускной способности существующих радиостанций с тем, чтобы полнее удовлетворять все возрастающую потребность страны в радиосвязи.

Решение этой задачи заключалось в организации так называемой многоканальной радиосвязи, т. е. такого вида радиосвязи, когда на одной и той же несущей частоте передается целый ряд телефонных или телеграфных сообщений. Оригинальные методы многоканальной радиосвязи были предложены советскими учеными.

Многоканальная передача сигналов по радио получила практическое применение. Но использование для этой цели

передатчиков с непрерывным излучением встречало ряд существенных затруднений по следующим причинам. Во-первых, по мере увеличения числа каналов при заданной дальности действия станции необходимо было увеличивать мощность передатчика, так как сигналы всех каналов передавались одновременно. Во-вторых, для уменьшения взаимного влияния соседних каналов приходилось усложнять приемную аппаратуру, что вело к увеличению ее стоимости.

Развитие импульсной техники привело к появлению новых методов многоканальной радиосвязи. Оказалось возможным передавать одновременно несколько различных сигналов при помощи одного и того же передатчика, работающего в импульсном режиме. Первый в мире способ импульсной радиосвязи был предложен советским ученым А. Н. Щукиным еще в 1930 г. В дальнейшем, на основе успехов, достигнутых радиолокацией, техника многоканальной радиосвязи получила широкое развитие, причем ясному пониманию процессов, происходящих при импульсной модуляции, во многом способствовали выдающиеся работы советских ученых.

Идея импульсной радиосвязи заключается в том, чтобы сделать последовательность импульсов «носителем» передаваемого сигнала. При обычной амплитудной модуляции носителем передаваемого сигнала, как известно, является огибающая высокочастотных колебаний, которая по форме повторяет модулирующий звуковой сигнал. При частотной модуляции носителем сигнала является изменяющаяся в такт с модулирующим сигналом частота колебаний.

Последовательность видеоимпульсов характеризуется: а) амплитудой импульса, б) длительностью импульса, в) периодом повторения импульсов.

Каждый из этих параметров импульсной последовательности можно сделать носителем передаваемого сигнала звуковой частоты. В зависимости от того, какой параметр импульсной последовательности является носителем сигнала, различают:

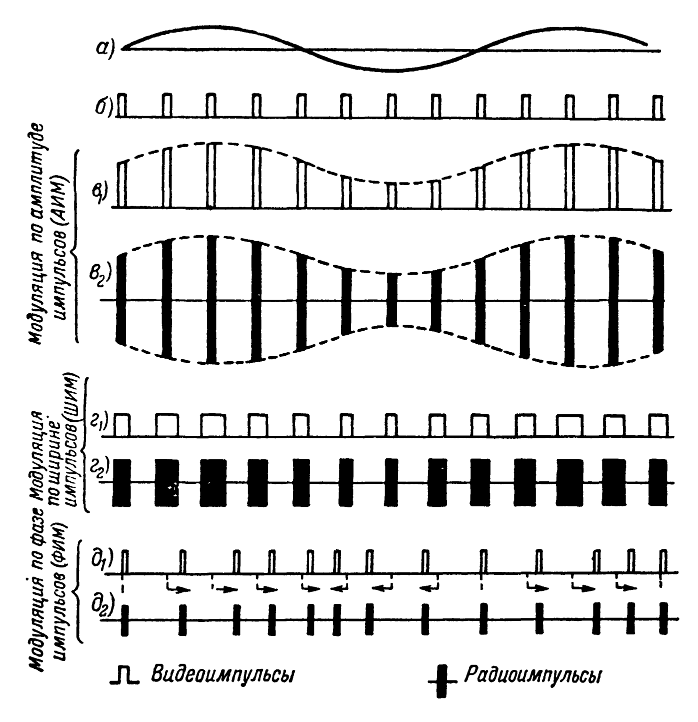
1) амплитудную импульсную модуляцию (АИМ), при которой по закону модулирующего напряжения (фиг. 36,*а*) изменяется амплитуда импульсов (фиг. 36,$в_1$);

2) широтную импульсную модуляцию (ШИМ), при которой по закону модулирующего напряжения изменяется ширина импульсов (фиг. 36,$г_1$);

3) фазовую импульсную модуляцию (ФИМ), при которой по закону модулирующего напряжения изменяется сме-

щение (фаза) импульсов относительно некоторого среднего положения (фиг. 36,$д_1$).

Особым видом импульсной модуляции является так называемая кодовая импульсная модуляция (КИМ), при ко-



Фиг. 36. Виды импульсной модуляции.

а—модулирующее напряжение; *б* — периодическая последовательность немодулированных видеоимпульсов; $в_1$ — $д_2$ — последовательности модулированных импульсов.

торой различным уровням напряжения модулирующего сигнала соответствует передача различных кодовых групп импульсов.

Модулированная последовательность импульсов, являющаяся носителем модулирующего сигнала, может быть передана на приемную аппаратуру по радио или по проводам. Неискаженная передача кратковременных импульсов на большое расстояние по проводам представляет собой сложную техническую задачу ввиду того, что обычные про-

водные линии очень сильно ослабляют и искажают короткие импульсы, а применение специальных линий передачи чрезмерно удорожает аппаратуру. Поэтому более предпочтительной является передача импульсных сигналов по радио. При этом модулированные последовательности видеоимпульсов используются для импульсной модуляции высокочастотного генератора. Последовательность радиоимпульсов, полученная на выходе генератора, в этом случае также оказывается модулированной по амплитуде, ширине или фазе импульсов (фиг. 36,$в_2$, $г_2$, $д_2$). На приемной стороне импульсные радиосигналы, принятые антенной, усиливаются приемником и детектируются, в результате чего вновь получается последовательность видеоимпульсов, модулированных по закону изменения передаваемого сигнала.

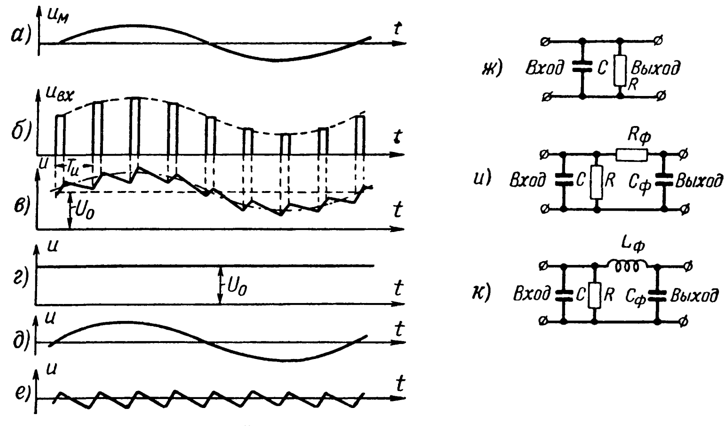
Практическое осуществление перечисленных выше операций над импульсами не встречает особых затруднений. Так, например, для того чтобы получить последовательность видеоимпульсов, модулированных по амплитуде звуковым напряжением, можно использовать обычный усилительный каскад на пентоде. Если на управляющую сетку запертой лампы подавать периодическую последовательность немодулированных видеоимпульсов, а напряжение на экранной сетке изменять со звуковой частотой, то импульсы тока, текущего по анодной цепи, окажутся модулированными по амплитуде. Осуществление других видов модуляции также не вызывает особых технических затруднений. Такие задачи, как импульсная модуляция высокочастотных генераторов, прием и детектирование импульсных сигналов достаточно полно решены применительно к радиолокации. Поэтому конструирование передатчиков и приемников импульсных связных радиостанций не составляет проблемы, характерной только для импульсной радиосвязи.

Специфическим для импульсной радиосвязи является вопрос о неискаженной передаче звуковых сигналов при помощи импульсов. Необходимо найти условия для удовлетворительного воспроизведения сигнала на приемной стороне и выяснить, как из модулированной последовательности видеоимпульсов можно выделить полезный сигнал звуковой частоты.

Процесс преобразования модулированной последовательности видеоимпульсов в напряжение, повторяющее по форме передаваемый сигнал, будем называть демодуляцией, а устройство, предназначенное для выполнения этой задачи,— демодулятором.

Для простоты рассуждений положим, что передача и прием импульсных сигналов не сопровождаются искажениями, и последовательность видеоимпульсов, получаемых на приемной стороне после детектирования, совершенно точно воспроизводит последовательность модулированных видеоимпульсов на передающей стороне.

Допустим, что на приемной стороне получена последовательность видеоимпульсов, модулированных по амплитуде звуковым напряжением $U_м$ частоты $F_м$ (фиг. 37). Подадим эту последовательность импульсов на вход цепи,



Фиг. 37. Принцип действия фильтра-демодулятора импульсных сигналов.

состоящей из параллельного соединения конденсатора C и сопротивления R (фиг. 37, *ж*). Во время действия импульса напряжение на конденсаторе C будет увеличиваться, а в паузах между импульсами — уменьшаться вследствие разряда конденсатора на сопротивление R. Чем больше амплитуда импульса, тем больше прирост напряжения на конденсаторе за время действия импульса. При надлежащем выборе постоянной времени цепи RC выходное напряжение будет иметь форму, подобную представленной на фиг. 37, *в*. Это напряжение содержит:

а) постоянную составляющую U_0 (фиг. 37, *г*);

б) переменную составляющую звуковой частоты $F_м$ (фиг. 37, *д*);

в) пульсирующую переменную составляющую (фиг. 37, *е*).

Если сигнал, полученный на выходе рассмотренной схемы, подать на звуковоспроизводящее устройство, то,

помимо звука с частотой $F_м$, будет прослушиваться ряд мешающих тонов, получающихся вследствие искажения синусоидального напряжения пульсирующей переменной составляющей.

Попытаемся найти пути уменьшения этих искажений. Пульсирующая переменная составляющая (фиг. 37, *е*) достигает наибольшего положительного значения один раз за каждый период повторения импульсов $T_и$, т. е. можно сказать, что ее частота равна частоте повторения импульсов $F_и$.

Для того чтобы последовательность модулированных импульсов характеризовала закон изменения модулирующего напряжения, на один период модулирующего напряжения должно приходиться несколько видеоимпульсов. Следовательно, частота повторения модулированных видеоимпульсов $F_и$ должна быть больше частоты модулирующего напряжения $F_м$.

В выпрямителях, преобразующих переменный ток в постоянный, для уменьшения пульсаций напряжений применяют сглаживающие фильтры, состоящие из комбинаций емкостей и сопротивлений или емкостей и индуктивностей. Однако, если в выпрямителях желательно полностью освободиться от переменных составляющих выпрямленного напряжения, то в рассматриваемом случае необходимо пропустить на выход фильтра модулирующую частоту $F_м$ и ослабить пульсирующее напряжение сложной формы и более высокой частоты $F_и$. Другими словами, нужен фильтр низких частот.

Рассмотренная нами цепочка RC (фиг. 37, *ж*) совместно с внутренним сопротивлением генератора входного напряжения R_i составляет простейший фильтр низких частот, не ослабляющий напряжение с частотой $F_м$ и подавляющий напряжения более высоких частот.

Емкостное сопротивление конденсатора уменьшается по мере увеличения частоты приложенного напряжения. Поэтому, чем выше частота входного напряжения, тем больше падение напряжения на сопротивлении R_i и тем меньше падение напряжения на выходном конденсаторе C. Эффективность срезания высших частот еще больше увеличивается, если простейший фильтр RC дополнить еще одной цепочкой $R_ф C_ф$ (фиг. 37, *и*) или поставить цепочку $L_ф C_ф$ (фиг. 37, *к*).

И, наконец, в том случае, если на выходе демодулятора поставлен колебательный контур, настроенный на частоту $F_м$, то фильтрация мешающих напряжений производится наилучшим образом. Выходное напряжение практически является синусоидальным напряжением частоты $F_м$.

Выше говорилось о том, что частота повторения импульсов $F_и$ должна быть выше частоты модулирующего напряжения $F_м$. Вообще говоря, чем выше частота $F_и$ по сравнению с частотой $F_м$, тем легче получить высококачественную передачу сигналов при помощи последовательности импульсов. Однако вполне удовлетворительная передача происходит уже в том случае, если на один период модулирующего напряжения приходится не менее трех импульсов, т. е. если частота повторения импульсов $F_и$ больше чем в 3 раза превосходит модулирующую частоту $F_м$. Обычно берут $F_и = (3 \div 4) F_м$.

Увеличивать частоту повторения импульсов сверх указанных значений невыгодно, так как на передачу лишних импульсов дополнительно расходуется энергия передающего устройства.

Рассуждения, проведенные для случая амплитудно-импульсной модуляции, остаются справедливыми и для других видов импульсной модуляции. Так, например, если на вход цепи, состоящей из параллельного соединения конденсатора C и сопротивления R подавать последовательность видеоимпульсов, модулированных по ширине (фиг. 37,*г*), то приращение напряжения на конденсаторе за время действия импульса будет тем больше, чем шире импульс. Вследствие этого напряжение на конденсаторе также будет по форме напоминать искаженную синусоиду, и для уменьшения искажений придется поставить лучший фильтр.

При фазовой импульсной модуляции все импульсы имеют одинаковую длительность и амплитуду, но зато временные интервалы между импульсами различны (фиг. 36,$д_1$), и разряд конденсатора за время паузы между импульсами будет тем меньше, чем ближе соседние импульсы. В этом случае напряжение на конденсаторе также будет представлять собой искаженную синусоиду, и для уменьшения искажений, как и в предыдущих случаях, придется поставить более совершенный фильтр низких частот.

Соотношение $F_и = (3 \div 4) F_м$ остается справедливым и для широтной импульсной и для фазовой импульсной модуляции. Мы рассмотрели случай, когда модулирующий сигнал имел форму синусоидальных колебаний с частотой $F_м$. В действительности передаваемый сигнал (речь, музыка и т. д.) имеет сложную форму и может быть представлен в виде суммы целого ряда синусоидальных колебаний с частотами от $F'_м$ до $F''_м$. Если последовательность видеоимпульсов модулируется таким напряжением сложной формы, то демодулятор должен пропустить без ослабления целую полосу звуковых частот от $F'_м$ до $F''_м$. Другими словами, если импульсный сигнал модулируется звуковым напряжением сложной формы, то демодулятор должен представлять собой полосовой фильтр низких частот. Частота повторения импульсов в этом случае должна быть такой, чтобы на один период самой высокой из модулирующих частот приходилось, по крайней мере, 3—4 импульса, т. е. должно выполняться условие

$$F_и = (3 \div 4) F_{м_{макс}}.$$

Нормальная разборчивость радиотелефонной передачи получается в том случае, если на вход звуковоспроизводящего устройства поступают без ослабления все звуковые частоты вплоть до частоты, равной:

$$F_{м_{макс}} = 3 \ кгц.$$

При этом

$$F_и = 9 \div 12 \ кгц.$$

На основании изложенного можно сформулировать некоторые общие условия, при выполнении которых последовательность видеоимпульсов достаточно верно отображает характер передаваемого сигнала звуковой частоты. Эти условия заключаются в следующем:

1) частота повторения импульсов $F_и$ должна быть в $3 \div 4$ раза больше наивысшей частоты модуляции $F_{м_{м кс}}$:

$$F_и = (3 \div 4) F_{м_{макс}}.$$

2) демодулятор импульсных сигналов, преобразующий последовательность модулированных видеоимпульсов в напряжение модулирующей частоты, должен представлять со-

бой полосовой фильтр низких частот, не имеющий завала частотной характеристики вплоть до частоты $F_{и\ макс}$. Эти условия справедливы для всех рассмотренных видов импульсной модуляции (АИМ, ШИМ и ФИМ). Напряжение звуковой частоты на выходе фильтра-демодулятора обычно бывает весьма незначительным и до подачи на звуковоспроизводящее устройство его приходится усиливать.

Дадим теперь некоторое представление о типовой аппаратуре связной импульсной радиостанции. На передающей стороне необходимо:

1) получить немодулированную периодическую последовательность видеоимпульсов с заданной частотой повторения импульсов;

2) промодулировать эту последовательность видеоимпульсов (по амплитуде, ширине или фазе) звуковым напряжением;

3) полученную модулированную последовательность видеоимпульсов нужно передать на приемник в виде радиосигнала, использовав ее для модуляции высокочастотного генератора.

В соответствии с этими задачами передающее устройство должно включать:

1) генератор немодулированной периодической последовательности видеоимпульсов;

2) модулятор, осуществляющий модуляцию видеоимпульсов по закону передаваемого сигнала;

3) устройство, осуществляющее модуляцию высокочастотного генератора;

4) высокочастотный генератор.

На приемной стороне необходимо:

1) усилить и демодулировать принятый радиосигнал, получив на выходе детектора видеоимпульсы, модулированные по амплитуде, по ширине или по фазе;

2) из полученной последовательности модулированных видеоимпульсов при помощи низкочастотного фильтра выделить полезные составляющие звуковых частот и, усилив их, подать на звуковоспроизводящее устройство.

В соответствии с этим приемное устройство должно включать:

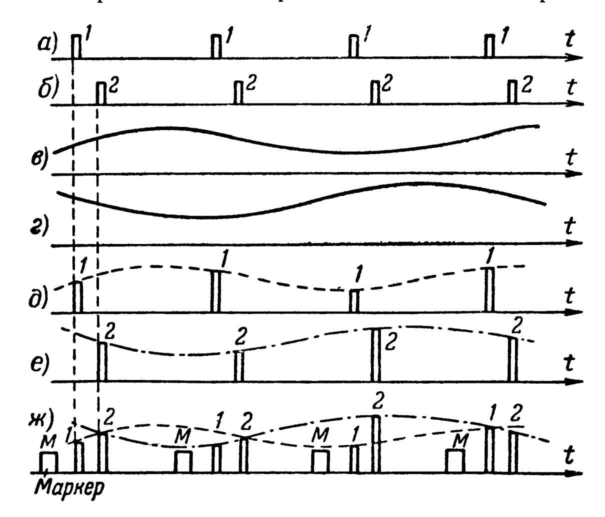
1) приемник импульсных радиосигналов;

2) фильтр-демодулятор периодической последовательности видеоимпульсов, модулированных по амплитуде, по ширине или по фазе;

3) усилитель звуковых частот и звуковоспроизводящее устройство.

Формы радиоимпульсов на входе приемника, видеосигнала на выходе детектора и звукового напряжения на выходе фильтра-демодулятора при неискаженной передаче подобны формам соответствующих сигналов на передающей стороне (фиг. 36).

Теперь допустим, что генератор немодулированных импульсов на передающей стороне создает две периодические



Фиг. 38. Сложение импульсов отдельных каналов в общую последовательность.

последовательности импульсов, имеющие одну и ту же частоту повторения, но сдвинутые по времени (фиг. 38,*а*, *б*).

Промодулируем последовательность импульсов (фиг. 38,*а*) напряжением сигнала, показанного на фиг. 38,*в* (1 канал), а последовательность импульсов (фиг. 38,*б*) — напряжением сигнала, показанного на фиг. 38,*г* (2 канал). После этого сложим модулированные видеоимпульсы (фиг. 38,*д*, *е*) в общую последовательность (фиг. 38,*ж*) и передадим их по радиолинии на приемное устройство.

На выходе детектора приемника будет получен смешанный сигнал, состоящий из импульсов обеих последовательностей (фиг. 38,*ж*).

Если этот сигнал сразу подать на фильтр-демодулятор, то на выходе его появится звуковое напряжение, не

имеющее ничего общего с сигналами, показанными на фиг. 38,*в* и *г*.

Поэтому, прежде чем производить демодуляцию, необходимо каким-то способом отделить импульсы 1 и 2 каналов друг от друга и подать их на отдельные фильтры.

В многоканальной системе с импульсной модуляцией при разделении каналов используется то обстоятельство, что импульсы отдельных каналов передаются в различные моменты времени. Для обеспечения возможности разделения каналов передаются дополнительные синхронизирующие импульсы, называемые маркерными импульсами или просто маркерами. Маркерные импульсы имеют ту же частоту повторения, что и импульсы каналов. По времени они являются первыми в каждой из передаваемых групп импульсов (фиг. 38,*ж*) и имеют какое-либо отличие от канальных импульсов (например, по длительности).

Благодаря последнему обстоятельству маркерные импульсы на приемной стороне удается выделить в отдельный канал и использовать их для разделения остальных каналов.

При амплитудно-импульсной модуляции аппаратура отличается простотой, но помехоустойчивость приема низка, так как помехи приводят к появлению паразитной амплитудной модуляции импульсов.

При широтной импульсной и фазовой импульсной модуляции для уменьшения воздействия помех можно применить двустороннее ограничение видеоимпульсов на приемной стороне, так как носителем звукового сигнала здесь является не амплитуда импульсов, а их ширина или временное положение (фаза). В практических устройствах для передачи по радиоканалу используется, как правило, широтная импульсная или фазовая импульсная, а не амплитудная импульсная модуляция. При фазовой импульсной модуляции амплитуды составляющих звуковой частоты на выходе фильтра-демодулятора получаются значительно ослабленными по сравнению с амплитудой импульса на его входе. Поэтому в ряде случаев на приемной стороне последовательность видеоимпульсов, модулированных по фазе, превращают в последовательность видеоимпульсов, модулированных по амплитуде, и только после этого производят демодуляцию импульсного сигнала. Для увеличения количества каналов передачи необходимо уменьшать временной интервал между канальными импульсами или же уменьшать длительность импульсов. Выше было установлено, что

частота повторения импульсов каждого канала должна быть не меньше 9 ÷ 12 *кгц*, т. е. временной интервал между соседними импульсами каждого канала не должен превосходить 80 ÷ 110 *мксек*. Поэтому для увеличения количества каналов приходится уменьшать длительность импульсов. При этом необходимо помнить, что между импульсами соседних каналов всегда нужно иметь некоторый временной «зазор» во избежание появления перекрестных искажений вследствие перекрытия импульсов соседних каналов во времени.

Если период повторения канальных импульсов равен 100 *мксек*, а число каналов равно 10, то длительность импульса при любом виде модуляции должна быть меньше 10 *мксек*.

В многоканальной импульсной радиосвязи, как и в радиолокации, приходится работать очень короткими импульсами, длительностью в единицы микросекунд.

Поэтому передатчики и приемники в данном случае будут иметь очень много общего с радиолокационными.

Для того чтобы яснее представить вопрос об использовании импульсных схем в системах многоканальной радиосвязи, дадим краткое описание одного из вариантов системы многоканальной импульсной радиосвязи.

10. ВОСЬМИКАНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОЙ РАДИОСВЯЗИ С ФАЗОВОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Описываемая система предназначается для многоканальной передачи радиовещательных программ. Для повышения качества воспроизведения звука спектр принимаемых звуковых частот увеличен до 8 000 *гц*. Это привело к необходимости увеличить частоту повторения импульсов каждого канала до 24 000 *гц*, чтобы на один период наивысшей звуковой частоты (8 *кгц*) попрежнему приходилось не менее трех импульсов. В системе используется фазовая импульсная модуляция. Длительность импульса равна 0,5 *мксек*, а максимальное изменение положения импульса в результате модуляции составляет ± 1 *мксек*. Маркерный сигнал, необходимый для разделения каналов на приемной стороне, состоит из двух импульсов, временной интервал между которыми равен 1,3 *мксек*.

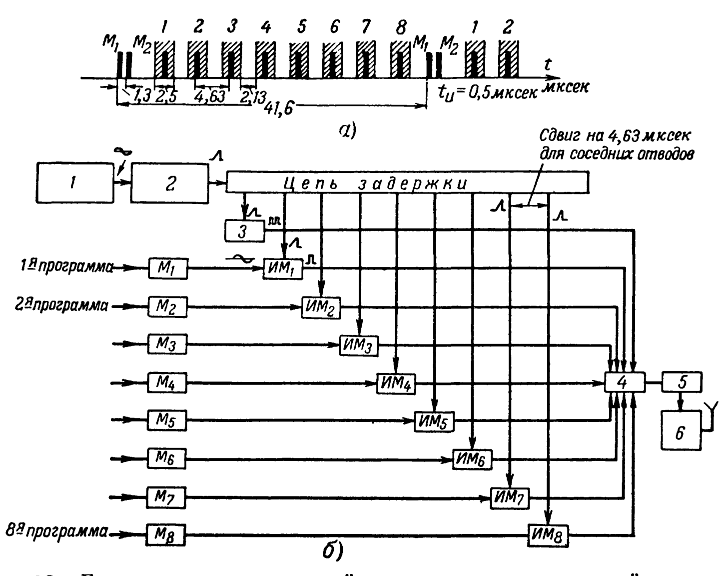
На фиг. 39,*а* изображена одна из групп видеоимпульсов, полученная после сложения каналов. Временной интервал

между немодулированными импульсами одного и того же канала равен:

$$T_u = \frac{1}{F_u} = \frac{1}{24\,000} \text{ сек.} = 42 \textit{ мксек.}$$

Для каждого канала, включая маркерный, должен быть отведен временной интервал не менее 2,5 *мксек.*

Нетрудно видеть, что при выбранном значении частоты повторения и при восьми каналах импульсы отдельных ка-



Фиг. 39. Блок-схема передающей части восьмиканальной системы импульсной радиосвязи с фазовой импульсной модуляцией.

1 — генератор синусоидального напряжения; 2 — генератор пилообразного напряжения; 3 — схема формирования маркера; 4 — смеситель канальных импульсов; 5 — модулятор; 6 — генератор.

налов можно разместить таким образом, чтобы предотвратить их перекрытие во времени.

На фиг. 39,*б* представлена блок-схема передающей части. Первичным элементом схемы является генератор синусоидальных колебаний (24 000 *гц*), обладающий высокой стабильностью частоты.

Напряжение этого генератора преобразуется в пилообразные импульсы с крутым задним фронтом, частота повторения которых равна 24 *кгц*, а длительность 6 *мксек*.

Эти пилообразные импульсы подаются на вход цепи задержки, не искажающей пилообразного напряжения. От де-

вяти точек цепи задержки берутся отводы с таким расчетом, чтобы пилообразные импульсы в точках отвода были сдвинуты друг относительно друга по времени на 4,63 *мксек*. Пилообразный импульс с первого отвода подается на схему формирования маркера, а импульсы с последующих восьми отводов поступают на вход канальных импульсных модуляторов $ИМ_1$ — $ИМ_8$.

Формирование маркера производится следующим образом. Пилообразное напряжение подается на двусторонний ограничитель, в результате чего получается почти прямоугольный импульс. Этот импульс подается на вход цепи задержки, разомкнутой на конце. На входе цепи задержки образуется двойной импульс. Он состоит из импульса, поступившего с выхода ограничителя, и из задержанного по времени импульса, который, дойдя до конца разомкнутой цепи задержки, отражается в обратном направлении и снова поступает на ее вход.

Временной интервал между прямым и задержанным импульсами маркера составляет 1,3 *мксек*.

Полученный двойной импульс-маркер подается на вход смесителя импульсов *4*.

В канальных модуляторах $ИМ_1 \div ИМ_8$ входной звуковой сигнал используется для получения последовательности видеоимпульсов, модулированных по фазе.

Лампа модулятора импульсов представляет собой двойной ограничитель (фиг. 40,*а*). В цепи ее управляющей сетки действуют три напряжения:

1) исходное отрицательное смещение U_0, полностью запирающее лампу в отсутствии прочих сигналов;

2) периодическая последовательность пилообразных импульсов с одного из отводов цепи задержки;

3) звуковое напряжение от микрофона.

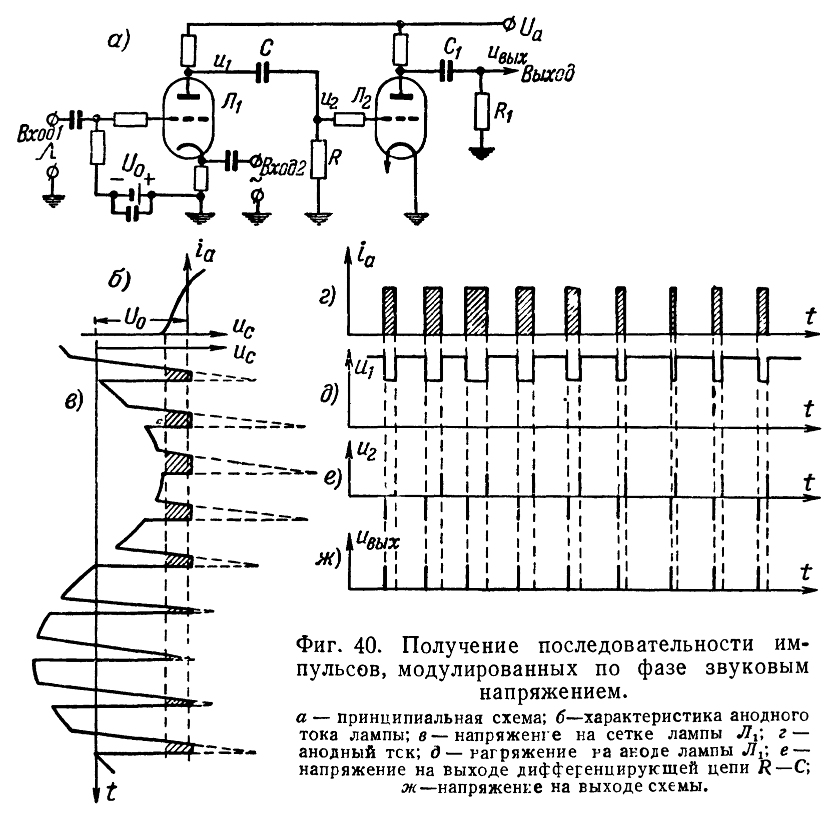
Если в цепь управляющей сетки лампы $Л_1$ подается, кроме смещения U_0, последовательность пилообразных импульсов, а сигнал звуковой частоты отсутствует, то анодный ток модуляторной лампы (при надлежащем выборе исходного смещения U_0 и амплитуды пилообразного напряжения) имеет характер почти прямоугольных импульсов одинаковой длительности.

Подача в цепь управляющей сетки напряжения звуковой частоты равносильна изменению смещения на сетке лампы со звуковой частотой (фиг. 40,*в*).

При этом импульсы анодного тока будут иметь различную длительность в зависимости от того, при каком значе-

нии синусоидального напряжения появляются пилообразные импульсы в сеточной цепи лампы.

Так как пилообразные импульсы имеют очень крутой задний фронт, то временной интервал между задними фронтами прямоугольных импульсов тока остается постоянным



Фиг. 40. Получение последовательности импульсов, модулированных по фазе звуковым напряжением.

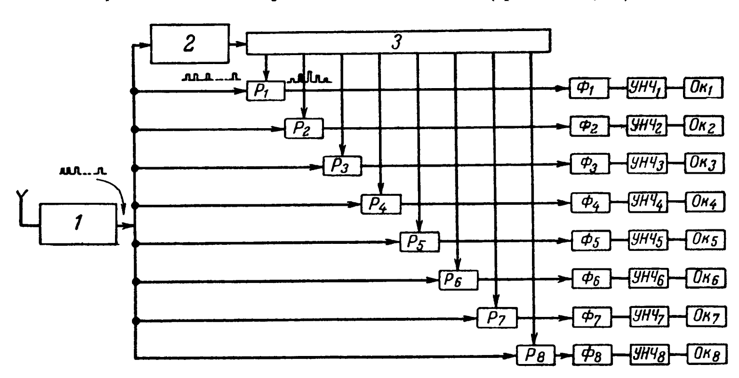
а — принципиальная схема; *б*—характеристика анодного тока лампы; *в* — напряжение на сетке лампы $Л_1$; *г* — анодный ток; *д* — напряжение на аноде лампы $Л_1$; *е* — напряжение на выходе дифференцирующей цепи *R—C*; *ж*—напряжение на выходе схемы.

и равным $T_и$ при любом уровне ограничения. В такт с напряжением звуковой частоты изменяется только положение переднего фронта импульсов тока (фиг. 40,*г*).

Напряжение на участке анод — катод лампы $Л_1$ будет иметь вид, показанный на фиг. 40,*д*. Если к анодной цепи лампы $Л_1$ присоединить дифференцирующую цепь *R—C* (фиг. 40,*а*), то на ее выходе получится последовательность коротких видеоимпульсов, изображенная на фиг. 40,*е*.

Отрицательные видеоимпульсы совпадают по времени с передним фронтом импульсов анодного тока, а положи-

тельные — с задними фронтами импульсов тока. Так как положение переднего фронта импульсов тока изменяется в такт с модулирующим напряжением звуковой частоты, то и положение отрицательных видеоимпульсов, полученных на входе дифференцирующей цепи (фиг. 40,*е*), изменяется в такт с модулирующим напряжением. Поэтому, срезав при помощи амплитудного ограничителя последовательность положительных импульсов, получим на выходе ограничителя (после переходной цепи R_1—C_1) последовательность видеоимпульсов, фаза которых изменяется в такт с модулирующим напряжением звуковой частоты (фиг. 40,*ж*).



Фиг. 41. Блок-схема приемной части восьмиканальной системы импульсной радиосвязи с фазовой импульсной модуляцией.

1—приемник; *2* — схема выделения маркера и получения пилообразного напряжения; *3* — цепь задержки.

Средние положения импульсов соседних каналов сдвинуты по времени на 4,63 *мксек*, т. е. на интервал, равный времени прохождения импульса между соседними отводами цепи задержки. Максимальный сдвиг импульса от среднего положения составляет ± 1 *мксек*.

Импульсы отдельных каналов и маркер складываются в общую последовательность (фиг. 39,*а*) и используются для модуляции высокочастотного генератора.

Приемное устройство (фиг. 41) состоит из приемника *1*, схемы выделения маркера *2*, распределителя импульсов в виде цепи задержки *3*, разделителей каналов $P_1 \div P_8$, фильтров-демодуляторов $Ф_1 \div Ф_8$ и оконечной аппаратуры (усилители и звуковоспроизводящие устройства).

На выходе приемника после двустороннего ограничителя получается последовательность импульсов (фиг. 42,*а*), подобная изображенной на фиг. 39,*а*.

Схема выделения маркера состоит из цепи задержки, разомкнутой на конце (время задержки равно 0,65 *мксек*), и одностороннего ограничителя.

На вход цепи задержки схемы выделения маркера поступает смешанный импульсный сигнал с выхода приемника (фиг. 42,*а*).

Каждый из импульсов, пройдя через цепь задержки, отражается в обратном направлении. Через время, равное 1,3 *мксек*, на вход цепи поступает задержанный импульс (фиг. 42,*б*).

Суммарное напряжение на входе одностороннего ограничителя будет состоять из последовательностей незадержанных и задержанных на 1,3 *мксек* импульсов. При этом незадержанный поздний маркер совпадает по времени с задержанным ранним маркером, и в результате сложения получается импульс $M_2 + M_1'$ увеличенной амплитуды (фиг. 42,*в*).

Обращаясь к фиг. 39,*а*, можно заметить, что во всей последовательности импульсов не может быть двух соседних импульсов, кроме сдвоенного маркера, временное расстояние между которыми равнялось бы 1,3 *мксек*.

Поэтому импульсы увеличенной амплитуды могут получиться только за счет наложения раннего задержанного маркерного импульса на незадержанный поздний. Срезая импульсы с малой амплитудой, получим на выходе одностороннего ограничителя периодическую последовательность одиночных маркерных импульсов (фиг. 42,*г*).

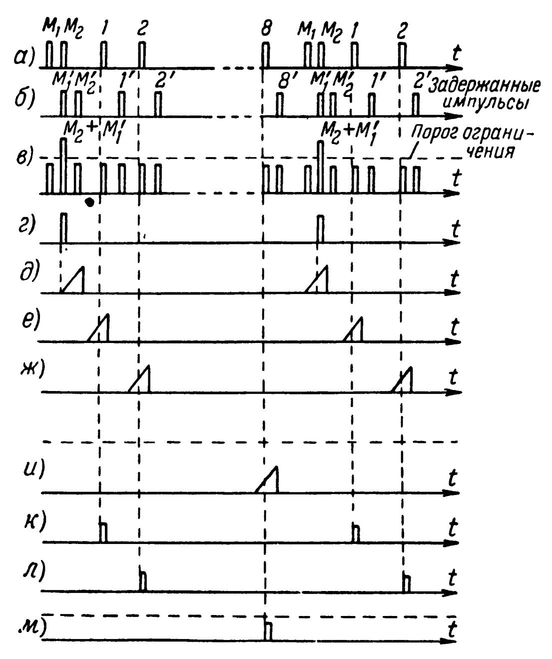
Эти импульсы расширяются, преобразуются в пилообразные импульсы длительностью 6 *мксек* (фиг. 42,*д*) и передаются вдоль линии задержки *3* (фиг. 41), играющей роль распределителя импульсов. С линии задержки берется восемь отводов с таким расчетом, чтобы импульсы в соседних точках отвода были сдвинуты по времени на 4,63 *мксек* (как и в передающем устройстве). Импульсы, полученные с отводов, *1*, *2* и *8*, показаны на фиг. 42,*е*, *ж*, *и*.

Разделитель каналов включает в себя пентод, который в отсутствии импульсов заперт по управляющей и по третьей сетке (фиг. 43,*а*).

На управляющую сетку этой лампы подаются пилообразные импульсы от одного из отводов цепи задержки, а на третью сетку — смешанная последовательность импульсов с выхода приемника (фиг. 42,*а*).

Лампа разделителя каналов может открыться лишь в то время, когда на обе ее сетки одновременно приходят отпирающие импульсы.

Для разделителя первого канала это произойдет в момент прихода пилообразного импульса от первого отвода цепи задержки (фиг. 42,*е*) и импульса первого канала *1* с выхода приемника (фиг. 42,*а*) для разделителя второго



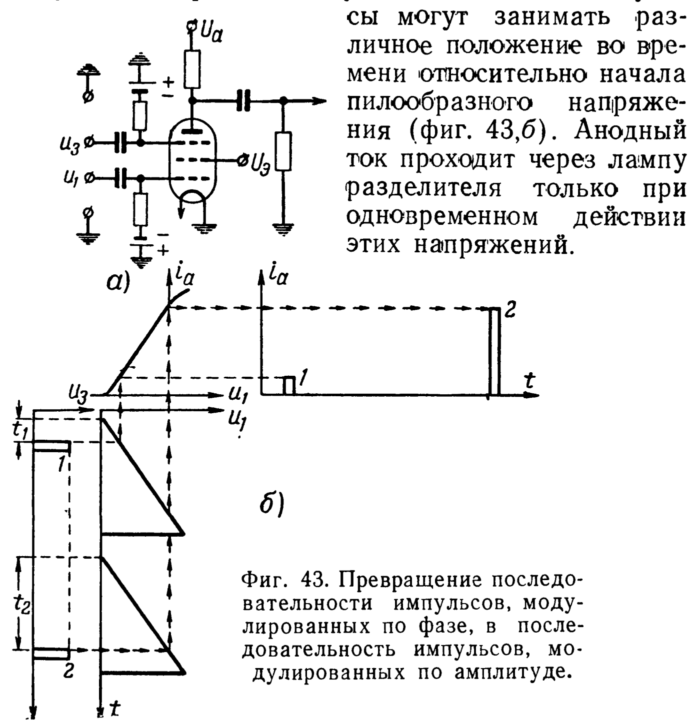
Фиг. 42. Разделение каналов на приемной стороне системы с фазовой импульсной модуляцией.

канала — в момент прихода пилообразного импульса от второго отвода цепи задержки (фиг. 42,*ж*) и импульса второго канала *2* с выхода приемника (фиг. 42,*а*) и т. д.

В результате этого на выходе каждого разделителя каналов импульсы появляются только в те моменты времени, когда на его вход поступают от приемного устройства импульсы данного канала (фиг. 42,*к* — для первого канала, фиг. 42,*л* — для второго канала, фиг. 42,*м* — для восьмого канала). Разделитель каналов, помимо выделения импульсов данного канала, выполняет еще одну важную функцию.

Эта функция заключается в преобразовании последовательности импульсов, модулированных по фазе, в последовательность импульсов, модулированных по амплитуде. Необходимость такого превращения вида модуляции была обоснована выше.

Указанное преобразование осуществляется следующим способом. Ввиду наличия фазовой модуляции, канальные импульсы могут занимать различное положение во времени относительно начала пилообразного напряжения (фиг. 43,*б*). Анодный ток проходит через лампу разделителя только при одновременном действии этих напряжений.



Фиг. 43. Превращение последовательности импульсов, модулированных по фазе, в последовательность импульсов, модулированных по амплитуде.

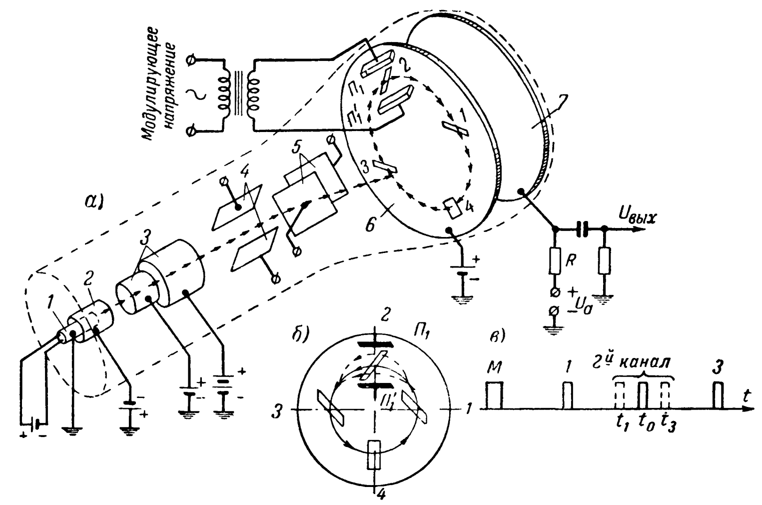
Чем позже появляется импульс данного канала, тем больше мгновенное значение величины пилообразного напряжения, подаваемого на первую сетку лампы, и, следовательно, тем больше амплитуда импульса анодного тока. Если положение импульсов сигнала изменяется со звуковой частотой, то и высота импульсов анодного тока изменяется со звуковой частотой (фиг. 43,*б*).

На выходе разделителя каналов появляется последовательность видеоимпульсов, модулированных по амплитуде. Эти импульсы подаются на фильтр низких частот, демодулируются, и полученное напряжение звуковой частоты после усиления поступает на звуковоспроизводящее устройство.

11. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ, МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ ВИДЕОИМПУЛЬСОВ

В ряде практических случаев для упрощения аппаратуры импульсной связной станции применяют электронно-лучевые трубки специальной конструкции. Рассмотрим два интересных примера использования специальных электронно-лучевых трубок для генерирования, модуляции и демодуляции видеоимпульсов.

Электронно-лучевые трубки для систем фазовой импульсной модуляции. Увеличение числа каналов импульсной радиостанции неизбежно влечет за собой усложнение аппаратуры. Поэтому в последнее время начали применяться специальные электронно-лучевые трубки, позволяющие значительно упростить процессы генерирования, модуляции и демодуляции импульсных сигналов. Рассмотрим вкратце устройство электронно-лучевых трубок, используемых в многоканальных системах с фазовой импульсной модуляцией.



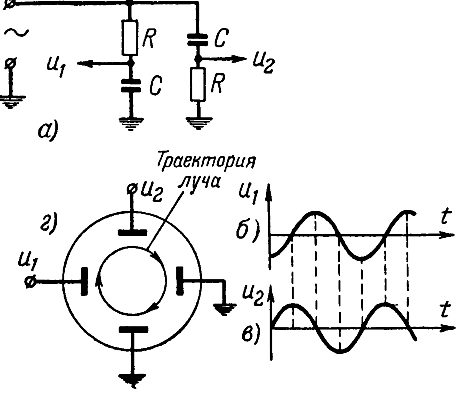
Фиг. 44. Электронно-лучевой коммутатор, устанавливаемый на передающей стороне системы с фазовой импульсной модуляцией.

а — устройство коммутатора; *б* — экран с прорезями; *в* — последовательность импульсов на выходе коммутатора.

Примечание. Дополнительные отклоняющие пластины показаны только около прорези *2*.

Коммутатор, устанавливаемый на передающей стороне (фиг. 44,*а*), представляет собой электронно-лучевую трубку

специальной конструкции, в которой, помимо обычных элементов: катода *1*, управляющего цилиндра *2*, фокусирующего устройства *3* и двух пар отклоняющих пластин *4* и *5*, находится экран *6* с прорезями и сплошной диск *7*, играющий роль анода. Перед каждой из прорезей экрана *6* установлены дополнительные отклоняющие пластины *П* и *П'* (на фиг. 44,*а* показана только одна пара таких пластин $П_1$ и $П_1'$). Форма прорезей, сделанных в экране *6*, показана на фиг. 44,*б*. К основным отклоняющим пластинам *4* и *5* подводятся переменные напряжения одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по фазе на 90°. Для получения таких напряжений достаточно взять две цепи, состоящие каждая из последовательного соединения конденсатора *C* и сопротивления *R* (фиг. 45,*а*), и подключить их к источнику переменного напряжения. Напряжение на конденсаторе первой цепи (фиг. 45,*б*) будет по фазе сдвинуто на 90° относительно напряжения на сопротивлении второй цепи (фиг. 45,*в*). Амплитуды этих напряжений будут равны, если выполняется условие:



Фиг. 45. Получение круговой развертки в электронно-лучевой трубке.

$$\frac{1}{\omega C}=R.$$

Под воздействием суммарного электрического поля, созданного обеими парами отклоняющих пластин, электронный луч приходит во вращательное движение (фиг. 45,*г*). Обращаясь снова к фиг. 44,*б*, видим, что электронный луч, попадая на экран *6* и двигаясь по окружности, последовательно обходит все прорези *1*, *2*, *3*, ... и т. д. В тот момент, когда электронный луч проходит прорезь, электроны устремляются к аноду *7*. В цепи питания анода проходит кратковременный импульс тока. После того как луч прошел прорезь, все электроны падают на поверхность экрана *6* и отводятся обратно на катод по цепи питания экрана. Ток

в цепи анода отсутствует. Амплитуды переменных напряжений, подаваемых на основные отклоняющие пластины 4 и 5, таковы, что электронный луч в своем движении проходит через центры всех прорезей, если на дополнительные отклоняющие пластины $П$ и $П'$ не подано напряжения. В результате этого видеоимпульсы, снимаемые с нагрузки анодной цепи R, следуют друг за другом во времени строго периодически, так как интервалы между всеми прорезями одинаковы, а электронный луч движется равномерно.

Теперь допустим, что к дополнительным отклоняющим пластинам $П_1$—$П_1'$ приложено некоторое напряжение, положительное относительно пластины $П_1$. В этом случае электронный луч, попадая в электрическое поле, находящееся между пластинами $П_1$ и $П_1'$, отклоняется вверх и проходит через прорезь немного раньше, чем в том случае, когда потенциалы пластин $П_1$ и $П_1'$ были одинаковы. Это будет соответствовать появлению импульса анодного тока в момент времени t_1, более ранний, чем момент времени t_0 (фиг. 44,*в*). Если положительный потенциал пластины $П_1$ увеличить, то электронный луч еще больше отклонится вверх и пройдет через прорезь еще раньше. Это будет соответствовать появлению импульса, в анодной цепи в момент времени, еще более ранний, чем момент времени t_1. Если же потенциал пластины $П_1$ сделать отрицательным относительно потенциала пластины $П_1'$, то электронный луч, попадая в электрическое поле между этими пластинами, отклонится вниз. Он будет запаздывать при прохождении прорези тем больше, чем ниже потенциал пластины $П_1$ по сравнению с потенциалом пластины $П_1'$. В результате этого импульсы анодного тока будут появляться в моменты времени, более поздние, чем момент времени t_0 (например, t_3). Соединим пластины $П_1$ и $П_1'$ с источником модулирующего напряжения и выберем скорость вращения луча такой, чтобы за время одного периода наивысшей частоты модуляции луч пробегал данную прорезь не менее 3—4 раз.

Нетрудно убедиться в том, что теперь импульсы, снимаемые с анодной нагрузки R, окажутся модулированными по фазе в соответствии с законом изменения синусоидального напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам $П_1$ и $П_1'$. Условие, которое было предъявлено выше к скорости вращения электронного луча, означает, что частота повторения импульсов будет в 3—4 раза больше частоты модулирующего напряжения, что необходимо для удовлетвори-

тельной демодуляции импульсного сигнала. Луч совершает один полный оборот за время одного периода синусоидального напряжения, приложенного к основным отклоняющим пластинам *4* и *5*. Следовательно, частота этого напряжения должна по крайней мере в 3—4 раза превосходить наивысшую частоту модулирующего напряжения.

К отклоняющим пластинам, связанным с другими прорезями, можно подвести модулирующие напряжения от других каналов. Таким образом, появляется возможность использовать описанную электронно-лучевую трубку для многоканальной передачи сигналов. Очевидно, что общее число каналов на единицу меньше числа прорезей в экране *6*, так как одна прорезь используется для маркерного импульса.

Импульсы, соответствующие различным каналам, складываются в общую последовательность непосредственно в анодной цепи трубки и с нагрузки анодной цепи *R* поступают для модуляции высокочастотного генератора. Для того чтобы на приемной стороне можно было правильно разделить импульсы по каналам, необходимо передавать маркерный импульс, который по времени должен предшествовать каждой группе канальных импульсов. Частота повторения маркерных импульсов должна равняться частоте синусоидального напряжения, приложенного к основным отклоняющим пластинам. Получение маркерного импульса не вызывает затруднений. Можно, например, получить маркер в виде широкого импульса, для чего одна из прорезей экрана должна быть сделана шире остальных (фиг. 44,*б*). Можно получить сдвоенный маркерный импульс, если сделать для маркера две прорези в экране. Электронный луч должен пересекать маркерную прорезь всегда в одном и том же месте, чтобы частота повторения маркеров была постоянна. Другими словами, маркерный импульс не должен модулироваться по фазе. Это достигается тем, что прорезь для маркера делается прямой.

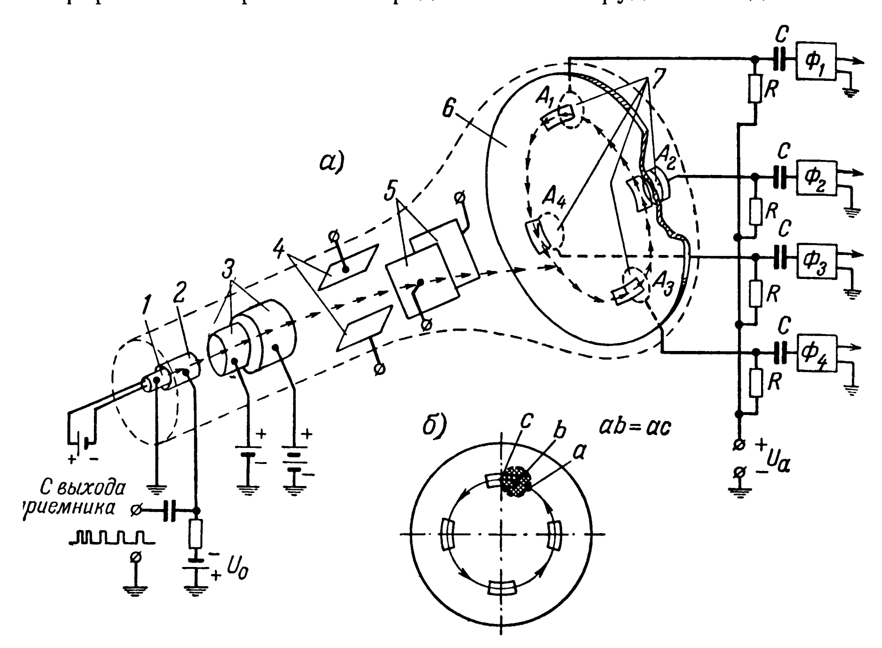
Рассмотренное устройство носит название электронно-лучевого коммутатора. Электронно-лучевой коммутатор, установленный на передающей стороне системы с фазовой импульсной модуляцией, одновременно выполняет несколько функций:

1) генерирует короткие видеоимпульсы отдельных каналов и маркерный импульс;

2) осуществляет фазовую импульсную модуляцию канальных импульсов;

3) складывает импульсы отдельных каналов в общую последовательность.

Передающее устройство получается простым по конструкции. Количество каналов определяется количеством прорезей в экране. Не представляет затруднений сделать



Фиг. 46. Электронно-лучевой коммутатор, устанавливаемый на приемной стороне системы с фазовой импульсной модуляцией.
а — устройство коммутатора; *б* — экран с прорезями.

экран с несколькими десятками прорезей. Длительность импульса зависит от поперечного размера прорези и от скорости вращения электронного луча. На приемной стороне устанавливается электронно-лучевой коммутатор, несколько отличный по конструкции. Этот коммутатор (фиг. 46,*а*) содержит катод *1*, управляющий цилиндр *2*, фокусирующее устройство *3*, две пары отклоняющих пластин *4* и *5*, экран с прорезями *6* и, наконец, систему анодов *7*, причем количество анодов равно числу прорезей в экране коммутатора передающей стороны. Аноды расположены сзади прорезей

экрана[1]. Из сложной последовательности видеоимпульсов, полученных на выходе приемника, прежде всего тем или иным способом выделяется периодическая последовательность маркерных импульсов. Частота повторения маркерных импульсов равна частоте синусоидального напряжения $F_к$, которое используется на передающей стороне для образования вращающегося электронного луча. В приемном коммутаторе электронный луч должен вращаться с такой же скоростью, с какой вращается луч в передающем коммутаторе. Поэтому прежде всего возникает необходимость превращения периодической последовательности маркерных импульсов в синусоидальное напряжение частоты $F_к$.

Для выполнения этой задачи можно использовать, например, контур ударного возбуждения, настроенный на частоту $F_к$. Если такой контур включить в анодную цепь лампы, а на управляющую сетку подать периодическую последовательность маркерных импульсов, частота повторения которых равна $F_к$, то в контуре возникнут синусоидальные колебания с частотой $F_к$. С выхода фазовращателя два напряжения, сдвинутых по фазе на 90°, подаются на отклоняющие пластины трубки. Если бы смещение, подаваемое на управляющий цилиндр трубки, было меньше напряжения запирания электронного луча, то электронный луч пришел бы в непрерывное вращательное движение. Однако в действительности на управляющий цилиндр подается большое запирающее напряжение и суммарная последовательность канальных видеоимпульсов с выхода приемника. Если трубка заперта, то можно говорить лишь о воображаемом непрерывном вращении луча. Воображаемое вращение луча становится действительным, когда на управляющий электрод поступают положительные канальные импульсы. Прорези в экране приемного коммутатора расположены по окружности так, как показано на фиг. 46,*б*. Если импульсы данного канала не модулированы по фазе, то электронный луч появляется в такое время, что на протяжении первой половины своего пути *ab* он ударяется в

---

[1] Практически, для более эффективной работы электронных коммутаторов, используемых на приемной стороне, вместо анодов A_1, A_2, A_3 и т. д. устанавливаются электроды, называемые динодами. Диноды—это электроды, покрытые специальным составом, обеспечивающим сильный динатронный эффект вследствие вторичной электронной эмиссии. В этом случае потенциал экрана *6* берется выше потенциала динодов. Экран *6* играет роль общего анода.

стенку экрана, а за вторую половину пути проходит точно половину прорези *bc*. При этом по цепи анода данного канала проходит импульс тока, длительность которого равна времени прохождения лучом отрезка *bc*. Если канальные импульсы модулируются по фазе, то они перекрывают либо больше половины прорези (при опережении), либо меньше ее половины (при отставании). Амплитуда импульса в анодной цепи пропорциональна количеству электричества, прошедшего по анодной цепи за время импульса. Следовательно, чем больше время движения луча вдоль прорези, тем больше амплитуда импульса в анодной цепи данного канала. Таким образом, в зависимости от фазы канальных импульсов, подаваемых на управляющий цилиндр трубки, изменяется амплитуда импульсов тока, проходящих по анодной цепи данного канала. Если фазу канальных импульсов изменять по синусоидальному закону, то в анодной цепи данного канала появится последовательность амплитудно-модулированных видеоимпульсов, причем модуляция этих импульсов происходит по тому же закону, по которому изменяется фаза канальных импульсов. Но фаза канальных импульсов изменяется в такт с модулирующим напряжением данного канала на передающей стороне. Поэтому амплитуда импульсов тока, проходящих по цепи канального анода на приемной стороне, будет изменяться по закону изменения модулирующего напряжения данного канала. Подавая последовательность импульсов напряжежения, возникающих на анодной нагрузке *R*, на фильтр-демодулятор, получим на его выходе напряжение звуковой частоты, которое повторяет по форме модулирующее напряжение данного канала.

Таким образом, электронно-лучевой коммутатор на приемной стороне выполняет следующие функции:

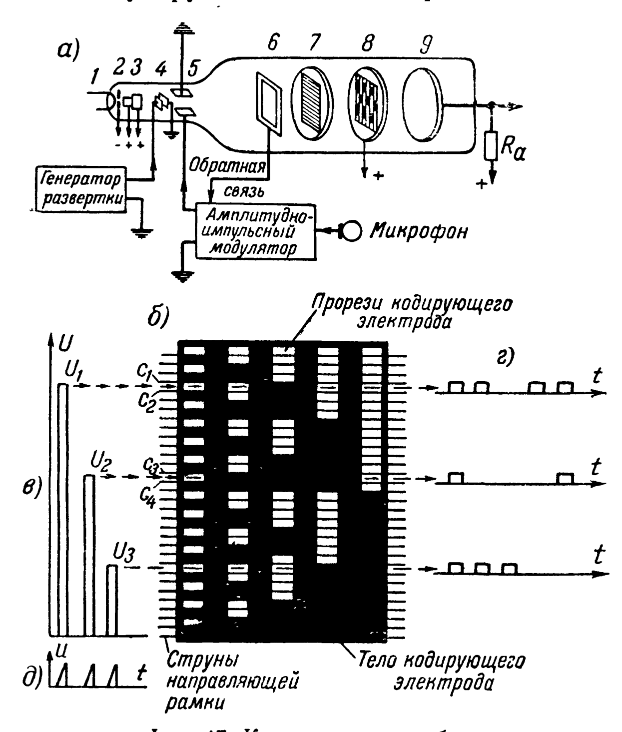
1) разделяет импульсы отдельных каналов, т. е. играет роль разделителя каналов;

2) превращает импульсы, модулированные по фазе, в импульсы, модулированные по амплитуде (выше говорилось о том, что для эффективной модуляции необходимо превратить импульсы, модулированные по фазе, в импульсы, модулированные по амплитуде или по ширине).

Использование электронно-лучевого коммутатора позволяет упростить аппаратуру на приемной стороне системы с фазовой импульсной модуляцией.

Электронно-лучевые трубки для систем с кодовой импульсной модуляцией. Помимо описанных выше систем

с амплитудной, фазовой и широтной импульсной модуляцией, находит практическое применение еще один вид импульсной модуляции, который носит название кодовой импульсной модуляции (КИМ). При кодовой импульсной модуляции модулирующий сигнал передается в виде так



Фиг. 47. Кодирующая трубка.

а — устройство трубки; *б* — кодирующий электрод; *в* — напряжение, приложенное к пластинам вертикального отклонения; *г* — кодовые группы импульсов; *д* — пилообразное напряжение развертки.

называемых кодовых групп импульсов, которые получаются при помощи специальной кодирующей электронно-лучевой трубки.

Внутри кодирующей трубки (фиг. 47,*а*) размещены: *1* — катод; *2* — управляющий электрод; *3* — фокусирующее устройство; *4* — пластины горизонтального отклонения; *5* — пластины вертикального отклонения; *6* — стабилизирующая рамка; *7* — направляющая рамка; *8* — кодирующий электрод; *9* — анод.

Конструкция первых пяти элементов ничем не отличается от конструкции подобных элементов обычной электронно-лучевой трубки с электростатическим управлением. Специфическими элементами кодирующей трубки являются стабилизирующая рамка *6*, направляющая рамка *7* и кодирующий электрод *8*. Между боковыми сторонами направляющей рамки *7* натянут ряд горизонтальных металлических струн, причем расстояние между соседними струнами всюду одинаково.

Допустим, что величина напряжения, приложенного к пластинам вертикального отклонения *5*, такова, что электронный луч ударяется в одну из металлических струн. При этом имеет место динатронный эффект: из струны выбиваются вторичные электроны, которые притягиваются положительно заряженной стабилизирующей рамкой *6*. По цепи стабилизирующей рамки течет ток. Появление этого тока приводит к тому, что в цепях модулятора (фиг. 47,*а*) вырабатывается некоторое дополнительное напряжение, которое поступает на пластины вертикального отклонения. В результате этого электронный луч несколько смещается по вертикали и, минуя струны направляющей рамки, попадает на кодирующий электрод. Если по тем или иным причинам электронный луч в дальнейшем опять попадет на одну из струн направляющей рамки, то он снова будет несколько сдвинут по вертикали и пройдет к кодирующему электроду, минуя струны направляющей рамки. Таким образом, электронный луч всегда находится между какими-либо двумя струнами направляющей рамки. Допустим, что напряжение, приложенное к пластинам вертикального отклонения, таково, что электронный луч попадает между струнами C_1 и C_2 (фиг. 47,*б*). Начальное значение напряжения, приложенного к пластинам горизонтального отклонения, возьмем таким, чтобы луч попадал в точку, лежащую на левом ребре кодирующего электрода. Кодирующий электрод представляет собой металлический экран, в котором имеются прорези, размещенные определенным образом (фиг. 47,*б*). Струны направляющей рамки разбивают кодирующий электрод на ряд горизонтальных рядов, состоящих из прямоугольных прорезей и прямоугольных участков тела электрода. В вертикальном направлении кодирующий электрод точно так же разбит на несколько рядов, состоящих из прорезей и участков тела электрода.

Если на пластины горизонтального отклонения *4* подать напряжение пилообразной формы, то электронный луч нач-

нет двигаться между струнами направляющей рамки C_1 и C_2 слева направо. Когда электронный луч ударяется в тело кодирующего электрода, ни один из электронов не достигает анода трубки (электроны возвращаются на катод по цепи питания кодирующего электрода). Если же электронный луч попадает в прорезь кодирующего электрода, то электронный поток устремится к аноду *9*. По анодной цепи пройдет импульс тока, длительность которого будет зависеть от скорости движения электронного луча и от длины прорези. Общее количество импульсов тока, образующихся в анодной цепи за время движения электронного луча из крайнего левого положения в крайнее правое положение, зависит от количества прорезей в горизонтальном ряду кодирующего электрода, а временное расположение этих импульсов определяется расположением прорезей в горизонтальном ряду кодирующего электрода. Так, например, при движении электронного луча между струнами направляющего электрода C_1 и C_2 будет получена группа из четырех импульсов, а при движении луча между струнами C_3 и C_4 — группа из двух импульсов, расположение которых показано на фиг. 47,*г*. Получаемые группы импульсов носят название кодовых групп импульсов. При переходе из одного горизонтального ряда в другой изменяются количество и расположение импульсов в кодовой группе. Однако переход луча из одного горизонтального ряда в другой возможен лишь в том случае, если изменится напряжение на пластинах вертикального отклонения.

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что количество импульсов в группе и их взаимное расположение зависят от величины напряжения, поданного на пластины вертикального отклонения.

Теперь представим себе, что на пластины вертикального отклонения подается последовательность видеоимпульсов, модулированных по амплитуде в соответствии с характером передаваемого сигнала (фиг. 47,*в*). Будем подавать на пластины горизонтального отклонения пилообразное напряжение (фиг. 47,*д*) каждый раз, когда на пластины вертикального отклонения приходит видеоимпульс. Скорость нарастания пилообразного напряжения выберем такой, чтобы за время, равное длительности видеоимпульса, электронный луч успел пробежать от левого до правого края кодирующего электрода. При этом за время действия каждого видеоимпульса в анодной цепи электронно-лучевой трубки будет образована кодовая группа импульсов, ха-

рактер которой будет определяться величиной амплитуды видеоимпульса, приложенного к пластинам вертикального отклонения. Амплитуды отдельных видеоимпульсов изменяются в зависимости от величины модулирующего напряжения. Поэтому и характер каждой кодовой группы будет определяться величиной модулирующего напряжения во время действия видеоимпульса (это напряжение можно считать приблизительно постоянным за время длительности видеоимпульса). Различным уровням модулирующего напряжения будут соответствовать различные кодовые группы (фиг. 47,*г*). Другими словами, каждый уровень напряжения сигнала как бы приобретает свой собственный паспорт, содержащий две рубрики: 1) количество импульсов в кодовой группе и 2) временное расположение этих импульсов. Однако следует заметить, что не всякое изменение амплитуды видеоимпульса обязательно приводит к смене кодовой группы, т. е. к переходу электронного луча из одного горизонтального ряда в соседний. Действительно, предположим, что общее количество горизонтальных рядов равно 32. Общую высоту кодирующего электрода обозначим через H. При этом высота каждого горизонтального ряда будет равна $1/32\,H$. Если для отклонения электронного луча в вертикальном направлении на высоту H требуется приложить к пластинам вертикального отклонения напряжение $U_{макс}$, то, очевидно, что для перехода луча из одного горизонтального ряда в другой потребуется изменить напряжение на величину, не меньшую чем $1/32\,U_{макс}$. Таким образом, при 32 горизонтальных рядах кодирующее устройство оказывается нечувствительным к изменениям амплитуд видеоимпульсов, меньшим чем $1/32\,U_{макс}$. Если бы количество горизонтальных рядов было равно не 32, а, скажем, 128, то тогда смена кодовой группы происходила бы уже при изменении амплитуды видеоимпульса на $1/128\,U_{макс}$. Чем больше число горизонтальных рядов, тем точнее реагирует кодирующее устройство на изменение амплитуды видеоимпульса, которое, в свою очередь, пропорционально изменению модулирующего напряжения.

Каждому горизонтальному ряду соответствует своя кодовая группа. Поэтому можно сказать, что для увеличения точности передачи модулирующего сигнала следует увеличивать количество кодовых групп. Однако при этом не следует забывать одного важного обстоятельства, которое заключается в том, что среди любых комбинаций кодовых

импульсов не должно быть ни одной повторяющейся комбинации. Действительно, предположим, что двум различным уровням напряжения, например, напряжению $8/32\,U_{макс}$ и $25/32\,U_{макс}$ соответствует кодовая группа, состоящая из трех импульсов, одинаково расположенных во времени. Очевидно, что при этом приемное устройство никаким образом не сможет различить уровни напряжения, равные 8/32 и 25/32 от $U_{макс}$. На приемной стороне произойдет путаница, которая не замедлит сказаться в виде искажения передаваемого сигнала. Положим, что наибольшее число импульсов в кодовой группе $N=5$. Оказывается, что при этом общее количество неповторяющихся кодовых групп по одному, по два, по три, по четыре и по пяти импульсов равно величине $z=2^N=2^5=32$.

Следовательно, при $N=5$ можно взять 32 горизонтальных ряда и получить точность передачи модулирующего напряжения равной $1/32\,U_{макс}$. Если бы наибольшее число импульсов в кодовой группе N было равно 7, то общее количество неповторяющихся кодовых групп по 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 импульсов было бы равно $2^7=128$, и точность передачи модулирующего напряжения составила бы $1/128\,U_{макс}$.

Напротив, при $N=3$ кодирующее устройство оказывается чувствительным лишь к изменению модулирующего напряжения, большим чем $1/8\,U_{макс}$.

Увеличение количества импульсов в кодовой группе приводит к усложнению кодирующего устройства. Поэтому обычно берут наибольшее число импульсов в кодовой группе равным $5 \div 7$. Последовательность кодовых импульсов снимается с нагрузки анодной цепи кодирующей трубки K_a и используется для импульсной модуляции высокочастотного генератора. Демодуляция сигналов на приемной стороне осуществляется довольно простыми методами. Кодовые группы импульсов подаются в цепь, состоящую из параллельного соединения конденсатора C и сопротивления R. Каждая кодовая группа импульсов заряжает конденсатор до вполне определенного напряжения, причем тот уровень напряжения, который получается в результате воздействия данной кодовой группы, не может повториться при воздействии любой другой кодовой группы.

Выполнение этого условия достигается путем надлежащего подбора постоянной времени цепи $R-C$. Располо-

жение прорезей на кодирующем электроде также подчиняется вполне определенным закономерностям. Кодовая группа импульсов, полученная при движении электронного луча в самом верхнем горизонтальном ряду кодирующего электрода, должна быть такой, чтобы конденсатор C в приемном устройстве зарядился до напряжения, пропорционального $U_{макс}$.

Кодовая группа для горизонтального ряда, второго сверху, должна быть такой, чтобы конденсатор C зарядился до напряжения, пропорционального $31/32\,U_{макс}$ (при $N=5$) и пропорционального $127/128\,U_{макс}$ при $N=7$.

В результате воздействия кодовой группы, полученной в горизонтальном ряду, третьем сверху, конденсатор должен зарядиться до величины, пропорциональной $30/32\,U_{макс}$ (при $N=5$) и т. д.

Подавая кодовые группы импульсов в цепь, состоящую из параллельного соединения конденсатора C и сопротивления R, получим вместо кодовой группы один импульс, амплитуда которого будет пропорциональна мгновенному значению модулирующего напряжения. Другими словами, цепь $R—C$ превращает кодовые группы импульсов в последовательности видеоимпульсов, модулированных по амплитуде. Подавая эти импульсы на вход обычного фильтра-демодулятора, получим на выходе напряжение, повторяющее по форме модулирующий сигнал звуковой частоты.

Промежутки между кодовыми группами импульсов данного канала можно использовать для передачи кодовых групп импульсов других каналов и получить, таким образом, многоканальную кодовую импульсную модуляцию. При этом для каждого канала требуется иметь свою кодирующую трубку. Применение кодовой импульсной модуляции обеспечивает высокую помехоустойчивость радиосвязи, так как в данном случае для правильного воспроизведения модулирующего сигнала на приемной стороне имеет значение только количество импульсов в группе и их расположение, а не параметры отдельных импульсов (амплитуда, длительность, фаза), подверженные искажениям за счет воздействия помех.

Рассмотрев основные принципы импульсной радиосвязи и примеры практического осуществления многоканальных импульсных радиостанций, можно убедиться в том, что и здесь импульсные устройства выполняют существенные, принципиально важные функции. Применяются цепи за-

держки, ограничители, блокинг-генераторы, мультивибраторы, дифференцирующие цепи, генераторы пилообразных импульсов и другие устройства, формирующие и преобразующие видеоимпульсы, и радиоимпульсы. Многоканальная импульсная радиосвязь является одной из наиболее важных областей применения импульсных устройств. Примеры использования электронно-лучевых трубок специальной конструкции для генерирования, модуляции и демодуляции импульсов дают еще одно свидетельство быстрого прогресса импульсной техники, которая не останавливается на использовании существующих импульсных схем, а находит все новые способы генерирования импульсов и управления импульсными процессами.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ

12. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОТЫСКАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Область применения импульсной техники далеко не исчерпывается радиолокацией, радионавигацией и импульсной радиосвязью. Диапазон практического использования импульсных схем непрерывно расширяется. Импульсные устройства начинают занимать почетное место и на столе физической лаборатории, и на диспетчерском пункте электростанции, и на радиозаводе. При помощи импульсных схем можно исследовать видеоусилитель телевизионного приемника, удобно и быстро оценить параметры фильтра или колебательного контура. Известны случаи, когда видеоимпульсы использовались в медицинских исследованиях для возбуждения мышечной и нервной тканей, а высокочастотные импульсы большой мощности применялись для пайки ответственных узлов электронных ламп. Импульсные схемы являются основными клетками ряда счетных машин, предназначаемых для выполнения сложнейших математических операций.

Дадим представление о некоторых примерах практического использования импульсных устройств при научных исследованиях и технических испытаниях.

Рассмотрим способ использования импульсных устройств для отыскания повреждений на проводных линиях большой протяженности.

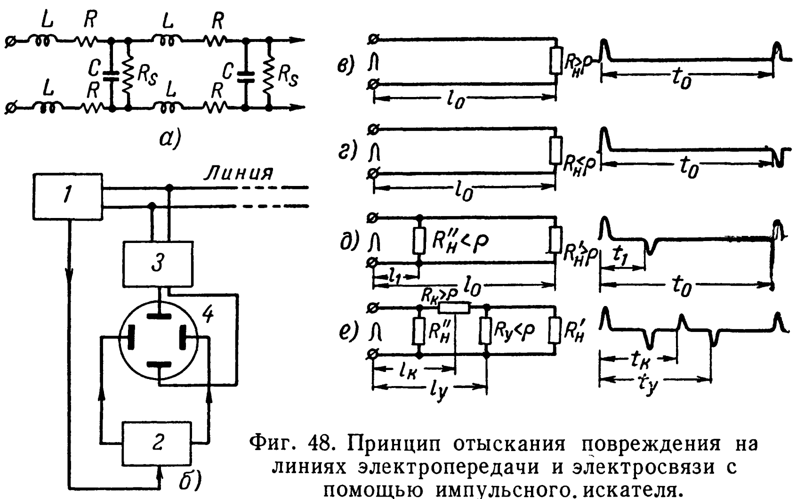
Четкая и бесперебойная работа линий электропередачи и электросвязи имеет важнейшее народнохозяйственное значение. Если на линии электропередачи произошла авария — значит, где-то остановились станки, если нарушилась электросвязь—значит, прервались важные телефонные разговоры. Поэтому всякое повреждение линий электропередачи или электросвязи должно быть немедленно устранено.

Для отыскания повреждения можно разделить линию на отдельные участки на промежуточных подстанциях и проверить электроизмерительными приборами каждый участок в отдельности. Если такая проверка не даст результатов, то придется выслать на линию наряд монтеров, которые, обходя ее километр за километром, должны будут найти место повреждения. Но линия электропередачи, а тем более линия связи, имеет зачастую длину в несколько сотен километров, и на отыскание повреждения иногда уходит время, исчисляемое не только минутами, но и часами.

Как отыскать повреждение на линии в кратчайший срок и при минимальном количестве персонала, занятого поисками повреждения? Этот вопрос уже давно волновал специалистов, обслуживающих линии электропередачи и электросвязи. Импульсная техника помогла энергетикам и связистам удачно разрешить стоявшую перед ними задачу. Импульсный метод отыскания мест повреждения на линиях электропередачи и электросвязи оказался наиболее простым. Идея этого метода сводится к посылке в поврежденную линию периодической последовательности видеоимпульсов с последующим наблюдением за отраженными сигналами при помощи электронно-лучевой трубки. Любой отрезок электрической линии обладает не только активным сопротивлением R, но и некоторой индуктивностью L. Между проводами имеется емкость C и активное сопротивление утечки R_s, появление которого объясняется несовершенством изоляции проводов. Поэтому любую электрическую линию, будь то линия электропередачи или линия электросвязи, можно представить в виде очень большого количества коротких отрезков, содержащих активные сопротивления, индуктивности и емкости (фиг. 48,*а*).

Электрическую линию можно считать своеобразной цепью задержки.

Зондирующий видеоимпульс, поданный на вход такой линии, будет перемещаться вдоль нее с определенной скоростью v и дойдет до конца линии через время $t_0 = \frac{l_0}{v}$ (l_0 — общая длина линии, v — скорость распространения электромагнитной энергии в линии). Если сопротивление, включенное на конце линии, равно ее волновому сопротив-



Фиг. 48. Принцип отыскания повреждения на линиях электропередачи и электросвязи с помощью импульсного. искателя.

а — эквивалентная схема линии; *б* — блок-схема импульсного искателя повреждений; *1* — генератор импульсов; *2* — генератор пилообразного напряжения; *3* — усилитель; *4* — электронно-лучевая трубка; *в* — *е* — импульсные характеристики линий при различных нагрузках.

лению $\rho = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ (L_1 и C_1 — индуктивность и емкость 1 *пог. м* линии), то отражения энергии от конца линии не последует.

Если же нагрузочное сопротивление линии не равно ее волновому сопротивлению, то часть энергии отразится от конца линии и появится на ее входе в виде отраженного импульса через время, равное $2t_0$. При помощи зондирующих импульсов, посылаемых в линию, запускается генератор пилообразного напряжения, подаваемого на пластины горизонтального отклонения электронно-лучевой трубки (фиг. 48,*б*). Вход линии соединяется через усилитель с пластинами вертикального отклонения. Если посылка зондирующих импульсов в линию производится периодически с частотой, большей 12 ÷ 15 *гц*, то на экране трубки

появится устойчивая световая линия развертки, на которой в виде всплесков будет изображаться зондирующий импульс, посланный в линию, и импульс, отраженный от ее конца. Очевидно, что в том случае, когда скорость развертки постоянна, интервал между зондирующим и отраженным импульсами t_0, отсчитанный по экрану трубки, будет прямо пропорционален длине линии l_0.

Отметим одно интересное обстоятельство. Если сопротивление $R_н$, включенное на конце линии, больше ее волнового сопротивления, то полярность отраженного импульса совпадает с полярностью зондирующего импульса и всплески обоих импульсов расположены по одну сторону линии развертки (фиг. 48, *в*). Если же нагрузочное сопротивление меньше волнового, то полярность отраженного импульса будет противоположна полярности зондирующего импульса, и всплески этих импульсов будут расположены по разные стороны от линии развертки (фиг. 48,*г*). Амплитуда отраженного импульса достигает наибольшего положительного значения для разомкнутой линии (сопротивление нагрузки равно бесконечности) и наибольшего отрицательного значения для короткозамкнутой линии (сопротивление нагрузки равно нулю).

После того как отраженный импульс дойдет до начала линии, начинается новое перемещение энергии к концу линии, и через время, равное $4t_0$, на вход линии придет второй отраженный импульс. Однако активные потери энергии в линии бывают обычно настолько велики, что со вторыми, третьими и дальнейшими импульсами, отраженными от конца линии, практически можно не считаться.

Различного рода нагрузки могут быть включены не только в конце линии, но также и в ее промежуточных точках (фиг. 48,*д*). Каждая из этих нагрузок даст свое отражение, причем полярность отраженного импульса будет зависеть от соотношения между сопротивлением нагрузки и волновым сопротивлением линии. Если скорость развертки постоянна, то расстояние между зондирующим и каждым из отраженных импульсов, отсчитанное по экрану трубки, будет прямо пропорционально расстоянию от начала линии до соответствующей нагрузки. Импульсную характеристику нормально работающей линии можно изобразить на графике, который будет храниться на диспетчерском пункте энергосистемы (для линий электропередачи) или на узле связи (для линий электросвязи). Допу-

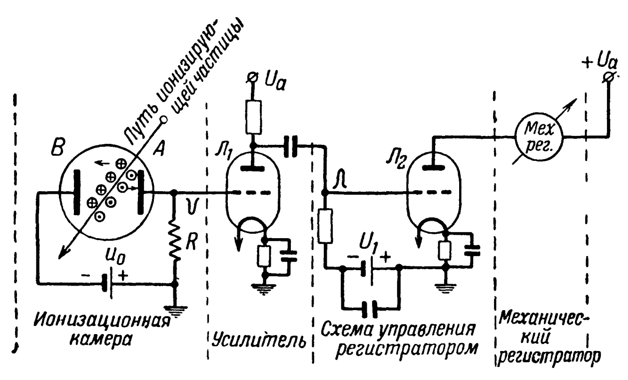
стим, что теперь на линии произошло повреждение, которое равноценно включению новой нагрузки. Наличие плохого контакта на расстоянии $l_к$ от начала линии равноценно включению в провод линии дополнительного большого сопротивления $R_к$ (фиг. 28, *е*), а появление дополнительной утечки на расстоянии $l_у$ равноценно включению в линию сопротивления $R_у$. Если сопротивление плохого контакта $R_к$ больше волнового сопротивления линии ρ, а сопротивление утечки $R_у$ меньше волнового сопротивления, то через время $t_к$ после посылки зондирующего импульса в линию на экране трубки появится положительный всплеск, а через время $t_у$ отрицательный всплеск. Сравнивая картину, получаемую на экране трубки при повреждении линии, с графиком импульсной характеристики нормальной линии (фиг. 48, *д*), можно сразу определить и характер неисправности (плохой контакт или утечка) и расстояние от начала линии до места повреждения.

Вся операция поиска места повреждения выполняется одним человеком, находящимся на диспетчерском пункте энергосистемы или на узле связи. Затем по телефону отдается команда линейному монтеру, который немедленно отправляется к уже известному месту повреждения.

Выпуск импульсных искателей повреждений хорошо освоен советской промышленностью. Один из приборов этой серии позволяет определять повреждения на линиях электропередачи и электросвязи длиной до 350—400 *км*. За несколько минут оказывается возможным найти повреждение, на поиски которого без импульсного искателя ушло бы много часов, а то и суток. Для увеличения точности измерений в импульсных искателях используются описанные в гл. 2 способы точных измерений отрезков времени. Применяются электрические масштабные линейки и ускоренные развертки. Масштабные метки в некоторых приборах получаются путем последовательного деления частоты повторения импульсов, выработанных схемой, первичным элементом которой является стабильный кварцевый генератор. Задача точного измерения временных интервалов требует применения в импульсных искателях повреждений разнообразных импульсных схем: блокинг-генераторов, дифференцирующих цепей, ограничителей, делителей частоты и т. д.

13. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

При проведении ряда физических исследований (например, при исследованиях космического излучения или при опытах с радиоактивными веществами) приобретает большое значение задача регистрации и подсчета количества мельчайших быстродвижущихся частиц материи. Для выполнения этой задачи конструируются специальные устройства, в которых импульсным схемам отводится далеко не последняя роль. Первичным элементом регистратора частиц является так называемая ионизационная камера



Фиг. 49. Счетчик импульсов.

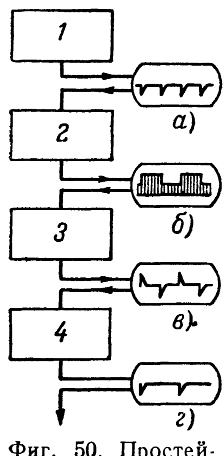
(фиг. 49). Внутри этой камеры, заполненной газом, находятся электроды A и B, соединенные с источником напряжения U_0, в цепи которого включено сопротивление R. Быстродвижущаяся частица (например, протон), попадая в камеру, соударяется с молекулами газа и ионизирует их, т. е. разбивает нейтральную молекулу на положительно заряженные ионы и отрицательно заряженные электроны. Под воздействием электрического поля, находящегося между пластинами, положительные ионы устремляются к отрицательно заряженной пластине B, а электроны — к положительно заряженной пластине A. Электроны, попадая на пластину A, немедленно перекачиваются источником напряжения U_0 через внешнюю цепь на пластину B и нейтрализуют положительный заряд ионов, притянутых этой пластиной. По внешней цепи проходит импульс тока, который заканчивается тогда, когда все ионы, возникшие в результате ионизации газа влетевшей в него частицей,

будут нейтрализованы. При прохождении импульса тока на сопротивлении R возникает импульс напряжения. Очевидно, что чем больше энергия частицы, влетающей в ионизационную камеру, тем большее количество ионов образуется в камере и тем больше амплитуда импульса напряжения на сопротивлении R. Количество импульсов, возникающих на сопротивлении R за некоторое время t, равно количеству частиц, влетевших за это же время в ионизационную камеру. Произведя подсчет количества электрических импульсов, возникающих на сопротивлении R в единицу времени, можно судить об интенсивности излучения ионизирующих частиц, а анализируя их по амплитудам, можно получить представление об уровне энергии, которую несут ионизирующие частицы.

Простейшее устройство, служащее для подсчета количества импульсов, содержит усилитель импульсов напряжения, полученных на сопротивлении R, механический регистратор и схему управления регистратором (фиг. 49). Механический регистратор состоит из электромагнита, обмотка которого включается в анодную цепь лампы $Л_2$, и счетного механизма, показания которого увеличиваются на единицу при каждом срабатывании электромагнита. Лампа $Л_2$, управляющая работой регистратора, в отсутствии импульса заперта исходным отрицательным смещением U_1 и отпирается только на время прихода положительного импульса от усилителя. При этом по обмотке электромагнита проходит ток, и показания счетчика увеличиваются на единицу. Механические счетчики обладают значительной инерцией, ввиду чего они не успевают фиксировать импульсы, появляющиеся чаще чем 100—120 импульсов в секунду. Если число импульсов превосходит 100—120 в секунду, то применение механических счетчиков оказывается возможным при использовании так называемых пересчетных схем. При помощи пересчетной схемы непосредственное измерение количества импульсов заменяется счетом количества групп импульсов, причем каждая из этих групп содержит вполне определенное количество импульсов.

Простейшая пересчетная схема состоит из реостатного триггера *2*, дифференцирующей цепи *3* и одностороннего ограничителя *4* (фиг. 50). Отрицательные импульсы напряжения (фиг. 50,*а*), полученные от ионизационной камеры *1*, подаются одновременно на управляющие сетки обеих ламп триггера.

В главе первой при описании работы триггера было отмечено, что такой способ подачи пусковых импульсов вызывает попеременное отпирание и запирание ламп триггера. Напряжение на выходе триггера имеет вид, показанный на фиг. 50,*б*. На выходе дифференцирующей цепи появляются кратковременные импульсы (фиг. 50,*в*), из которых положительные или отрицательные срезаются. Каждый из полученных, таким образом, односторонних импульсов (фиг. 50,*г*) соответствует каждому второму импульсу, пришедшему на вход триггера. Если поставить еще один каскад пересчетной схемы, то каждый импульс на ее выходе будет соответствовать каждому четвертому импульсу на входе первого триггера. Если импульсы с выхода второго триггера использовать для управления работой механического регистратора, то фактическое количество импульсов, появившихся на выходе ионизационной камеры, будет получено путем умножения показаний счетчика на четыре. Сложные пересчетные схемы позволяют получить весьма большой коэффициент пересчета.



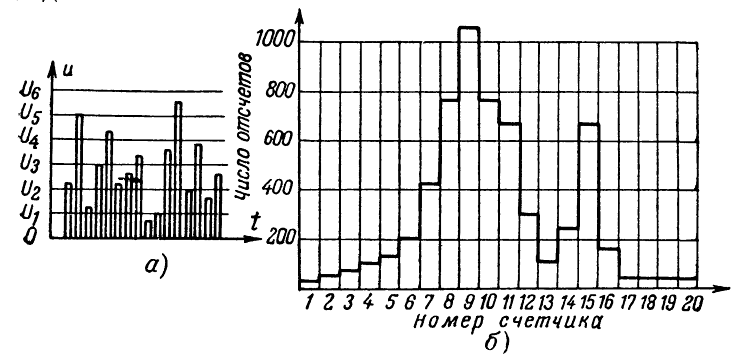
Фиг. 50. Простейшая пересчетная схема.

1 — ионизационная камера; *2* — реостатный триггер; *3* — дифференцирующая цепь; *4* — односторонний ограничитель.

Для анализа импульсов по их амплитудам используются так называемые амплитудные анализаторы. Амплитудный анализатор представляет собой обычную схему амплитудного ограничения.

Импульсы напряжения, полученные с помощью ионизационной камеры (фиг. 51,*а*), усиливаются и подаются одновременно на вход нескольких двусторонних ограничителей, имеющих разные пороги ограничения. Затем при помощи счетных схем производится подсчет импульсов, амплитуды которых лежат в пределах от 0 до U_1, от U_1 до U_2 и т. д. Путем некоторых предварительных операций можно установить, какова должна быть энергия ионизирующих частиц, чтобы амплитуды импульсов, подаваемых на вход амплитудного анализатора, лежали бы в пределах от 0 до U_1, от U_1 до U_2 и т. д. Поэтому, подсчитав при помощи счетной схемы количество частиц, амплитуды которых лежат в заданных пределах, можно представить энергетический спектр потока ионизирующих частиц как зависимость между энергией частицы

и количеством частиц, обладающих данной энергией (фиг. 51,*б*). Нахождение энергетического спектра потока частиц представляет важную задачу в ряде физических исследований.



Фиг. 51. Анализ амплитуд импульсов.

а — пороги ограничения различных счетчиков; *б* — энергетический спектр ионизирующих частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели целый ряд импульсных устройств и убедились в том, что все они состоят из одних и тех же элементов — мультивибраторов, ограничителей, блокинг-генераторов, дифференцирующих и задерживающих цепей, делителей частоты и т. д.

Однако подобно тому, как художник, пользуясь десятью—пятнадцатью красками, создает волнующее произведение искусства, так и инженер, имея в своем распоряжении очень небольшой набор импульсных схем, создает устройство, которое позволяет летчику держать верный курс в ночном полете или помогает физику в сложнейших исследованиях.

Импульсная техника, как и всякая другая отрасль советской техники, находится в состоянии непрерывного развития и совершенствования. То, что вчера еще казалось пределом, сегодня является пройденным этапом. И можно с уверенностью сказать, какая бы задача ни встала перед советскими учеными и инженерами, работающими в области импульсной техники, эта задача, безусловно, будет разрешена. Порукой этому — неограниченные возможности социалистической промышленности и замечательные труды советских ученых, заложившие прочный фундамент для развития импульсной техники.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ПО ИМПУЛЬСНЫМ СХЕМАМ

Предлагаем читателю ответить на ряд вопросов и решить несколько задач, пользуясь материалом данной книги

ВОПРОСЫ

1. На вход цепи RC (см. фиг. 9) подается положительный прямоугольный импульс длительностью 5 *мксек*. Какова форма напряжения на сопротивлении R, если:

а) $R = 10\,000$ *ом*, $C = 5\,000$ *мкмкф*,

б) $R = 50\,000$ *ом*, $C = 10$ *мкмкф*.

Примечание. В обоих случаях предполагается, что после окончания импульса вход цепи RC закорачивается.

2. Как изменится длительность импульса, вырабатываемого ждущим мультивибратором (см. фиг. 12,*а*), если:

а) уменьшить сопротивление R_2;

б) увеличить сопротивление R_3;

в) увеличить емкость конденсатора C_0.

3. Триггер (см. фиг. 13,*а*) длительно находится в состоянии устойчивого равновесия. Лампа $Л_1$ заперта, а $Л_2$ — открыта. Какие процессы произойдут в схеме, если оборвать провод, соединяющий сопротивление R_4 с анодной цепью лампы $Л_1$?

4. На выходе импульсного устройства получена последовательность видеоимпульсов с периодом повторения T. Какие можно предложить способы управления триггером, который должен вырабатывать:

а) прямоугольные импульсы длительностью $0{,}5T$ с интервалами между импульсами, равными $0{,}5T$;

б) прямоугольные импульсы длительностью $3T$ с интервалами между импульсами, равными $3T$.

5. Какова форма напряжения на выходе переходной цепи RC, если ее вход соединен с анодом лампы генератора пилообразного напряжения (см. фиг. 17,*а*)?

6. Что изменится на диаграмме, изображенной на фиг. 16, если в точке $Г$ задерживающей цепочки (фиг. 16,*а*) включено сопротивление, равное волновому?

7. Как с помощью генератора синусоидального напряжения с частотой 300 *кгц* получить метки для электрической масштабной шкалы индикатора радиолокационной станции, имеющие частоту повторения 100 и 10 *кгц*?

8. Как получить на экране электронно-лучевой трубки устойчивую световую картину в виде трех концентрических окружностей?

9. Предложите схему для выделения маркерного импульса, отличающегося от канального импульса по длительности.

10. В системе с фазовой импульсной модуляцией длительность маркерного импульса равна 3 *мксек*, длительность канального импульса — 1 *мксек*. Максимальное смещение импульса относительно нейтрального положения при модуляции составляет $\pm 1{,}5$ *мксек*.

Сколько каналов может иметь такая система, если необходимо передавать звуковые сигналы с частотами до 5 *кгц*?

ЗАДАЧИ

Ниже предлагаются две задачи. Определите, какие импульсные схемы могут быть использованы для обеспечения работы описываемых приборов, и составьте блок-схемы этих приборов.

Задача 1. Прибор, служащий для измерения разности фаз двух синусоидальных напряжений U_1 и U_2 одинаковой частоты F, имеет следующее устройство.

Вначале преобразование формы напряжений U_1 и U_2 производится в отдельных каналах. В каждом канале входное синусоидальное напряжение U_1 или U_2 превращается в напряжение прямоугольной формы с периодом повторения $T = \frac{1}{F}$, после чего вырабатываются кратковременные импульсы, соответствующие по времени одному из вертикальных фронтов прямоугольного напряжения. Так как синусоидальные напряжения U_1 и U_2 сдвинуты по фазе на некоторый угол φ, то и кратковременные импульсы, выработанные в канале напряжения U_1 и в канале напряжения U_2, сдвинуты по фазе на угол φ. Временной интервал между этими импульсами

$$t_\varphi = \frac{\varphi}{360^\circ} T$$

пропорционален разности фаз φ.

Далее кратковременные импульсы обоих каналов воздействуют на схему, вырабатывающую импульсы длительностью t_φ, с периодом повторения T. Эти импульсы через диод поступают на цепочку, состоящую из последовательно соединенных сопротивления R и конденсатора C.

Во время действия импульсов конденсатор заряжается, а в промежутках между импульсами разряжается на сопротивление R. Постоянная времени цепи разряда значительно превышает интервал между импульсами T. Поэтому на конденсаторе устанавливается некоторое среднее напряжение, пропорциональное длительности импульса t_φ, а, следовательно, и сдвигу фаз φ.

Вольтметр, измеряющий это напряжение, может быть проградуирован непосредственно в градусах разности фаз.

Задача 2. Используя импульсные схемы, можно представить на экране электронно-лучевой трубки семейство анодных характеристик электронной лампы [1].

Прибор, выполняющий эту задачу, устроен следующим образом.

Переменное напряжение с частотой 50 *гц* подается на фазосдвигающее устройство, на выходе которого получается 12 синусоидальных напряжений, равномерно сдвинутых по фазе. Каждое из этих напряжений превращается в последовательность кратковременных импульсов. Импульсы соседних каналов сдвинуты по фазе на 30°

Далее следуют две цепи. В цепи *А* импульсы всех каналов смешиваются и используются для запуска генератора, вырабатывающего пилообразное напряжение длительностью $T_п$. Во второй цепи *Б* импульсы отдельных каналов воздействуют на схемы расширения импульсов, которые вырабатывают прямоугольные импульсы, равные по длительно-

---

[1] Напомним, что анодной характеристикой называется зависимсcть анодного тока лампы i_a от напряжения на аноде u_a при постоянном напряжении на сетке u_c.

сти пилообразному напряжению T_n. Прямоугольные импульсы отдельных каналов отличаются тем, что их амплитуды уменьшаются по мере увеличения номера канала.

Пилообразное напряжение, полученное на выходе цепи *А*, подается на пластины горизонтального отклонения луча трубки и одновременно — на анод испытуемой лампы. Прямоугольные импульсы положительной полярности с выхода цепи *Б* подаются на управляющую сетку испытуемой лампы, запертой исходным отрицательным смещением.

Допустим, что при подаче прямоугольного импульса первого канала напряжение на сетке становится равным нулю. На анод испытуемой лампы подается пилообразное напряжение. Ток ее непрерывно возрастает. Включим в анодную цепь небольшое сопротивление *R*. Напряжение на этом сопротивлении используем для отклонения электронного луча трубки в вертикальном направлении. Соединим сопротивление *R* с пластинами вертикального отклонения. На пластины горизонтального отклонения подано пилообразное напряжение. Нетрудно представить себе, что под воздействием напряжений, поданных на систему отклоняющих пластин, световое пятно прочертит на экране электронно-лучевой трубки линию, форма которой будет соответствовать анодной характеристике лампы, снятой при значении сеточного напряжения $u_c = 0$.

Во время прихода на сетку испытуемой лампы прямоугольного импульса второго канала ее сеточное напряжение будет иметь уже другую величину $u'_c < 0$ (так как амплитуда прямоугольного импульса второго канала меньше амплитуды импульса первого канала). Световое пятно на экране трубки прочертит анодную характеристику испытуемой лампы, соответствующую напряжению на сетке u'_c.

Затем последовательно будут прочерчены на экране анодные характеристики при напряжениях на сетке $u''_c < u'_c$, $u'''_c < u''_c$ и т. д. Одиннадцатый канал используется для создания на экране масштабных меток величины анодного тока. Во время действия двенадцатого канала схема возвращается к исходному состоянию.

Далее вновь начинается „снятие характеристики“ при $u_c = 0$ (действует первый канал) и т. д. Так как процессы прочерчивания данной анодной характеристики повторяются 50 раз в секунду, наблюдатель увидит на экране электронно-лучевой трубки устойчивую световую картину в виде семейства анодных характеристик испытуемой лампы, снятых при 10 различных значениях напряжения на управляющей сетке.

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Форма напряжения на выходе цепочки *RC* определяется соотношением между длительностью импульса t_u и величиной постоянной времени *T*. Для дифференцирующей цепочки $T \ll t_u$, а для переходной цепочки $T \gg t_u$. В первом случае цепь *RC* является переходной, а во втором — дифференцирующей.

2. При уменьшении сопротивления R_2 падение напряжения на аноде открытой лампы $Л_1$ увеличивается, и длительность импульса, равная времени запирания лампы $Л_2$, уменьшается.

При увеличении сопротивления R_3 время перезаряда конденсатора C_0 увеличивается, и длительность импульса возрастает.

При увеличении емкости конденсатора C_c увеличивается постоянная времени цепи перезаряда. Длительность импульса также увеличивается.

3. Сетка лампы $Л_2$ окажется под большим отрицательным потенциалом U_0 и лампа $Л_2$ закроется. Возрастание напряжения на ее аноде приведет к отпиранию лампы $Л_1$.

4. а) Сформировать с помощью ждущего мультивибратора, дифференцирующей цепи и одностороннего ограничителя последовательность импульсов, сдвинутых на 0,5T относительно первоначальных, и использовать обе последовательности импульсов для запуска триггера;

б) использовать делитель частоты с коэффициентом деления $n = 3$

5. Постоянная составляющая через конденсатор не передается. На выходе получается пилообразное напряжение такой формы, что площади кривых, лежащих над осью времени и под ней будут одинаковы.

6. Вся энергия импульса будет поглощена сопротивлением нагрузки. На фиг. 16,*е* и *ж* импульсов не будет, на фиг. 16,*з* останется первый импульс.

7. Сформировав импульсы с частотой повторения 300 *кгц*, уменьшить при помощи делителей частоту повторения в 3 и 30 раз.

8. Пользуясь свойством послесвечения трубки, наложить на экран три световых следа круговой развертки различных радиусов и периодически повторять этот процесс не менее 12—15 раз в секунду.

9. Можно использовать схему заряда конденсатора с последующим ограничителем по максимуму. Во время действия более широкого импульса приращение напряжения на конденсаторе будет достигать уровня, достаточного для отпирания лампы ограничителя.

10. Так как требуется передавать звуковые сигналы с частотами до $F_м = 5$ *кгц*, то частота повторения импульсов каждого канала должна быть по крайней мере равна $F_и = 3F_м = 15$ *кгц*. Период повторения $T_и = \frac{1}{F_и} \approx 67$ *мксек*. Каждый канал с учетом защитного промежутка занимает интервал времени порядка 5 *мксек*. Следовательно, общее количество каналов не должно превышать 12.

Задача 1. В каждом канале необходимо использовать: двусторонний ограничитель, дифференцирующую цепочку, односторонний ограничитель-усилитель. Для получения импульсов длительностью $t_ц$ нужно использовать триггер.

Задача 2. Двенадцатифазное синусоидальное напряжение можно получить, например, с помощью гониометра, имеющего 12 катушек, сдвинутых в пространстве под углом 30°. Две неподвижные взаимно перпендикулярные катушки гониометра будут питаться от одного и того же источника с частотой 50 *гц* со сдвигом фаз на 90°.

Далее в схеме следуют двусторонние ограничители, дифференцирующие цепочки и односторонние ограничители-усилители. В цепи *Б* для расширения импульсов можно использовать ждущие мультивибраторы.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3

Глава первая. **Импульсы и импульсные схемы** 5

1. Что такое импульс 5
2. Видеоимпульсы и радиоимпульсы 8
3. Основные импульсные схемы 11

Глава вторая. **Импульсная техника в радиолокации** 35

4. Импульсные устройства в радиолокационной станции . . 35
5. Импульсные устройства в схемах измерения времени . 39

Глава третья. **Импульсная техника в радионавигации** 48

6. Принципы действия радионавигационных систем 48
7. Определение местоположения объекта с помощью дальномерно-разностной радионавигационной системы . . . 50
8. Использование импульсных схем в дальномерно-разностной радионавигационной системе 56

Глава четвертая. **Использование импульсных устройств в системах многоканальной радиосвязи** 67

9. Принципы импульсной радиосвязи 67
10. Восьмиканальная система импульсной радиосвязи с фазовой импульсной модуляцией 78
11. Использование электронно-лучевых трубок специальной конструкции для генерирования, модуляции и демодуляции видеоимпульсов 86

Глава пятая. **Использование импульсных устройств при научных исследованиях и технических испытаниях** . . . 99

12. Использование импульсных устройств для отыскания повреждений на линиях электропередач и электросвязи . . 99
13. Использование импульсных устройств при физических исследованиях 104

Заключение 107

Вопросы и задачи по импульсным схемам 108

Ответы на вопросы и задачи 110

2 р. 70 к.